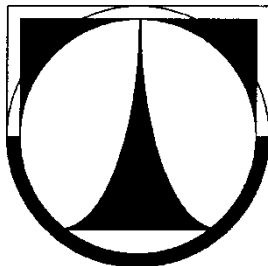


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**MĚŘENÍ OTÁČEK TURBODMYCHADLA S VYUŽITÍM
ANALYZÁTORU PULSE**

**Measuring the rotation rate of turbocharger using the PULSE
analysis device**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jana Vacková

Leden 2011

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302R022

Stroje a zařízení

Zaměření

Dopravní stroje a zařízení

**MĚŘENÍ OTÁČEK TURBODMYCHADLA S VYUŽITÍM
ANALYZÁTORU PULSE**

**Measuring the rotation rate of turbocharger using the PULSE
analysis device**

Bakalářská práce

KVM - BP - 214

Jana Vacková

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Novák Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Počet stran: 45

Počet obrázků: 36

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 3.1.2011

Poděkování

Děkuji panu Ing. Janu Novákovi, který mi poskytl cenné rady a konzultace při zpracovávání této práce, byl mi také nápomocen při měření v laboratořích KVM.

Abstrakt

Práce obsahuje pět hlavních částí, první část je věnována turbodmychadlu. Zde je popsán vývoj turbodmychadla až do současné sériové výroby, jeho činnost a pracovní režimy. Druhá část práce, se zabývá jednotlivými druhy měření otáček turbodmychadla. Jsou zde teoreticky popsány jednotlivé navrhované metody měření otáček, které by mohly být využívány při měření v laboratořích KVM (Katedra vozidel a motorů). Ve třetí části je seznámení s analyzátozem PULSE a programem PULSE LabShop, který je používán při měření v laboratořích KVM. Čtvrtá část je věnována praktickému měření, zde jsou popsány měřené metody, postupy a snímače použité při praktickém měření v KVM. Je zde také náhled programového prostředí PULSE LabShop, ve kterém vyhodnocujeme výsledky měření. Poslední, pátá část této práce zhodnocuje praktická měření, která byla prováděna na jednotlivých stanovištích v KVM.

This bachelor theses composes of five parts. The initial part describes the turbocharger and presents main principles of it's functions, it's working regimes as well as it's evolution up to point of today's series manufacturing. The second part deals with different methods of measuring the rotation speed of the turbocharger. Theoretical background on proposed methods available for measuring the rotation speed at laboratories of KVM (Katedra vozidel a motorů) is outlined. The description of PULSE analyser unit and of the PULSE LabShop programe which was used for data analysis is adresssed in the third part. The PULSE ananalyser unit and PULSE LabShop programe are used during the measurements in KVM laboratories. The fourth part is devoted to the measurement of the rotation speed of turbocharger carried out in KVM. The measuring setups, sensors and obtained data are presented as well as insight into the PULSE LabShop programming enviroment. The last part of this thesis concludes the measured data which were obtained using different techniques available in KVM laboratories.

Klíčová slova

Turbodmychadlo, Analyzátor PULSE, Wastegate, By-pass, Intercooler, Mechanické přepřňování, Indukční snímač, Měření vibrací

Turbocharger, Analyzer PULSE, Wastegate, By-pass, Intercooler, Mechanical Supercharging, Induction sensor, Measuring of vibrations

1 Obsah

1	Obsah	7
2	Úvod	9
3	Turbodmychadlo	10
3.1	Historie turbodmychadla	10
3.2	Současné použití turbodmychadel a jejich princip	11
3.2.1	Činnost turbodmychadla	11
3.2.2	Režimy turbodmychadla	14
3.2.3	Ostatní principy přepínání	14
4	Metody měření otáček turbodmychadla	17
4.1	Měření otáček indukčním snímačem	17
4.2	Měření otáček z vibrací turbodmychadla	19
4.3	Měření otáček laserovým snímačem	19
4.4	Měření otáček snímačem na principu vířivých proudů	20
4.5	Měření otáček analýzou zvuku	21
5	Návrh měření otáček turbodmychadla pomocí analyzátoru PULSE	22
5.1	Analyzátor PULSE	22
5.2	Použití analyzátoru PULSE u jednotlivých způsobů měření otáček	23
6	Provedené zkoušky na jednotlivých stanovištích v laboratořích KVM a ČZ Turbo Strakonice	24
6.1	Zkoušky prováděné v ČZ Turbo Strakonice	25
6.2	Zkoušky prováděné v laboratořích KVM	32
6.2.1	Měření na stanovišti motoru Cummins	33
6.2.2	Měření na stanovišti motoru Zetor	38
7	Závěr a doporučení pro využití v laboratořích KVM	41
8	Použité zdroje a literatura	43
9	Seznam obrázků	44

Seznam použitých zkratk a symbolů

FFT Fast Fourier Transformation, rychlá Fourierova transformace

TTL Transistor-Transistor Logic, transistorová logika

VW Volkswagen

B&K Brüel & Kjaer

2 Úvod

Turbodmychadlo je v dnešní době jedno z nejpoužívanějších zařízení k přeplňování motoru. Jeho výhodou je, že na jeho pohon využíváme výfukových spalin a odebíráme motoru méně energie než u mechanického přeplňování. V dnešní době je toto zařízení hojně využíváno všemi výrobci automobilů.

Otáčky turbodmychadla jsou důležitým parametrem, který ovlivňuje dynamiku motoru a celého vozidla. Proto je důležité znát okamžité otáčky turbodmychadla při různém zatížení motoru. Je mnoho způsobů jak měřit otáčky turbodmychadla, ne vždy jsou všechny způsoby vyhovující. Například měření pomocí optického snímače se nedá vždy použít a to z důvodu nutnosti odstranění sacího potrubí. Proto se musí zvážit způsob, jakým se otáčky turbodmychadla budou měřit, aby nebylo ovlivněno další měření prováděné na motoru.

Tato práce je zaměřena na zhodnocení navržených metod měření otáček turbodmychadla. Vyhodnotí jejich dostupnost, náročnost a spolehlivost a navrhne nejlepší možné měření otáček s využitím v laboratořích KVM.

3 Turbodmychadlo

3.1 Historie turbodmychadla

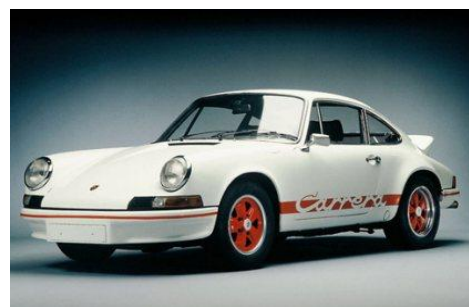
Turbodmychadla jsou téměř skoro stejně stará jako spalovací motory. Již na přelomu 19. a 20. století Gottlieb Daimier a Rudolf Diesel se snažili zvětšovat výkon spalovacích motorů. Snažili se o to, aby motor měl při relativně malé spotřebě větší výkon tím, že se pokoušeli stlačovat vzduch nasávaný do motoru.

První turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny však sestrojil Alfred J. Buchi v letech 1909 - 1912. O tři roky později navrhl prototyp dieselového motoru na impulsní přeplňování, který však v té době neuspěl.

V třicátých letech minulého století se vývoj přeplňovaných velkých motorů pohnul kupředu. Přeplňované motory používaly lodě, lokomotivy a průmyslové stroje. Válečné období přineslo velký rozvoj hlavně plynovým turbínám a to díky leteckému průmyslu. Vyvinula se spousta nových materiálů a také se začali používat nové konstrukce. Ty umožňovaly vývoj turbodmychadel zejména v dieselových motorech.

V roce 1954 díky Kurtu Beirerovi začínají některé značky nákladních automobilů, jako je Cummins, Scania a Volvo, používat kompaktní model turbodmychadla.

Přeplňované motory však stále čekaly na svůj čas, který přišel až v sedmdesátých letech při palivové krizi. Jejich rozvoj také zapříčinily přísnější emisní normy spalin, díky čemuž nastal veliký rozmach turbodmychadel v nákladních automobilech.



Obrázek 1: Porsche 911 Turbo

U osobních aut se koncept turbodmychadla zatím neuchytil a to zejména pro jejich slabý výkon a nízkou úspornost. Opravdový přelom nastal až v osmdesátých letech kdy jako první sériově vyráběné auto s turbodmychadlem bylo Porsche 911 Turbo v roce 1974. Dále to byl Mercedes série 300 a Volkswagen Golf, tyto auta byli vybaveny dieselovým přeplňovaným motorem. Byl to moment, kdy toto řešení zvítězilo i u osobních automobilů a přetrvává dodnes.

3.2 Současné použití turbodmychadel a jejich princip

3.2.1 Činnost turbodmychadla

Turbodmychadlo je zařízení, které má na jedné straně hřídele lopatkové dmychadlo, které nasává a stlačuje vzduch do válce. Na druhé straně hřídele je lopatková turbína, která je umístěna ve výfukovém potrubí a je roztáčena výfukovými plyny, které odcházejí z válce.



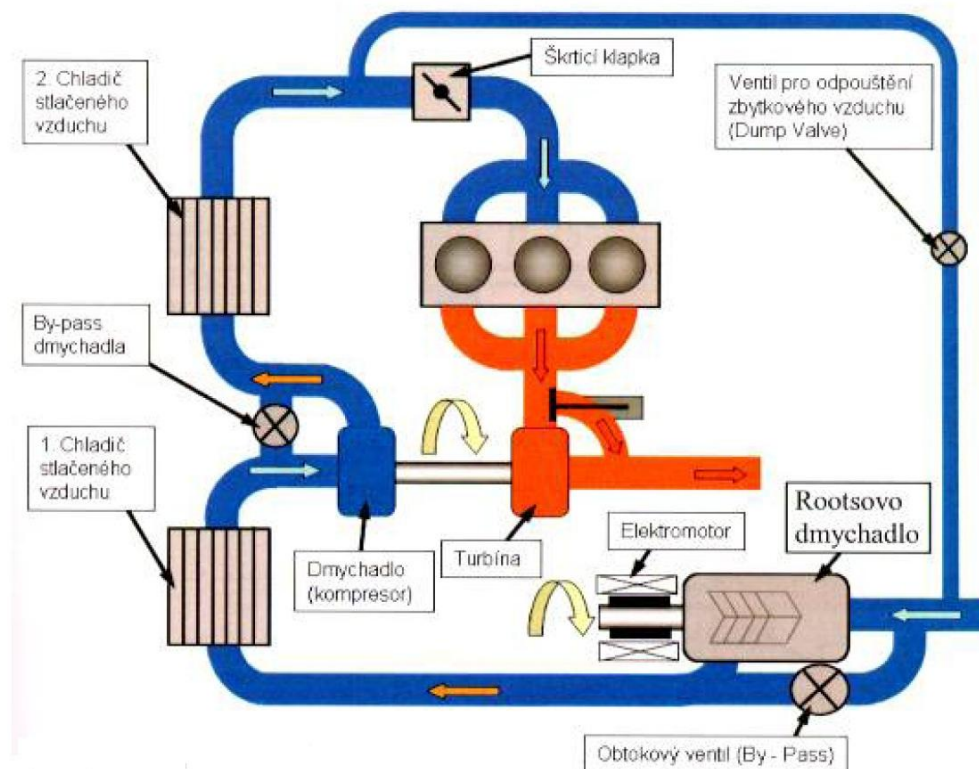
Obrázek 2: VW turbodmychadlo

Turbodmychadla se začala používat zejména pro zvýšení výkonu, kterého dosáhneme principem přeplňování, aniž by se extrémně zvedla hmotnost motoru. Tento princip dovoluje stavbu objemově menšího motoru, který má výkonové parametry podstatně většího motoru při dosažení nízké spotřeby.

Dmychadlo stlačuje vzduch proudící do motoru, tak aby se dostalo více vzduchu do válce a tím se mohlo přidat více paliva.

Pro stlačování vzduchu dmychadlem využíváme výfukových spalin, což je z energetického hlediska velice výhodné. Výfukové spaliny roztáčí turbínu uloženou ve výfukovém potrubí, která je na hřídeli spojena s dmychadlem. Vysoké otáčky turbodmychadla vyžadují precizní uložení hřídele. Používají se kluzná ložiska, která drží hřídel na tenké vrstvě oleje nebo kuličková ložiska vyžadující stálý přívod mazacího oleje, který zajišťuje mazání a chlazení ložisek hřídele. Velkou pozornost musíme věnovat i vysokým teplotním rozdílům, které jsou až 1000°C mezi kompresorem a turbínou, vyžadují přesnou výrobu a materiály, které odolávají těmto teplotám. Turbínové kolo je většinou vyrobeno z žáropevné niklové slitiny a jeho skříň je z temperované šedé litiny. Oběžné kolo i skříň dmychadla je z hliníkové slitiny.

Většina moderních motorů má položené maximum momentu v nízkých otáčkách a tak je i dmychadlo dimenzováno na malé hmotnostní toky výfukových plynů. S vyššími otáčkami však nastává nežádoucí zvýšení plnicího tlaku a proto se plnicí tlak omezuje. Jedním z řešení je například použití systému paralelního obtokového kanálu s obtokovým ventilem Wastegate, který je otevírán elektromagneticky z řídicí jednotky motoru. Jeho otevření se řídí tlakem v sacím potrubí a je zabudován v tělese turbodmychadla.



Obrázek 3: Schéma zapojení turbodmychadla s přidavným mechanickým dmychadlem

Regulovat tlak však můžeme i na straně dmychadla a to principem By-pass. Na obrázku 3 můžeme vidět oba způsoby regulace. Novější způsob regulace plnicího tlaku je turbodmychadlo s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny. Tato varianta regulace se používá pouze u vznětových motorů a to z důvodu příliš vysokých teplot výfukových plynů. V tomto principu je použit zákon kontinuity toku tekutin. Ve srovnání s předchozím principem regulace prochází turbínou stále celý objem výfukových plynů. Při nízkých otáčkách motoru je nastavitelnými lopatkami zmenšen průřez, kterým proudí výfukové plyny, tak aby se tlak před lopatkami zvýšil, čímž dojde ke zvýšení rychlosti plynů. Naopak při vysokých otáčkách motoru je průtokový průřez v místě rozváděcích lopatek maximálně zvětšen. Ovládání natočení lopatek bývá většinou řešeno pneumatickými nebo elektrickými akčními členy. Dalším hojně používaným prvkem příslušenství moderních turbomotorů je Intercooler (chladič stlačeného vzduchu).

Intercooler zvyšuje výkon motoru tím, že chladí stlačený vzduch z kompresoru před tím, než vstoupí do motoru. Ochlazením se sníží teplota vzduchu, což je výhodné pro zlepšení stupně naplnění motoru při sacím zdvihu.

3.2.2 Režimy turbodmychadla

Turbodmychadlo má tři pracovní režimy, které se mění se stoupajícími otáčkami. Pro přeplňovaný motor je důležitý pouze režim s optimálním plnicím tlakem, kdy je turbodmychadlo plně funkční.

Režim nízkého plnicího tlaku nastává při velmi nízkých otáčkách, kdy nám turbodmychadlo neplní skoro žádnou funkci. Z tohoto důvodu se do některých motorů přidává mechanické plnění, které se odpojí ve chvíli, kdy turbodmychadlo dosáhne požadovaných otáček a je schopno požadovaného přeplňování.

Režim s optimálním plnicím tlakem nastává přibližně od 1000 ot/min. V tomto režimu je turbodmychadlo plně funkční a zajišťuje požadované přeplňování motoru. Otáčky turbodmychadla se v tomto režimu mění a mění se i tlak, kterým se vzduch vhání do válců. Plnicí tlaky jsou rozdílné u jednotlivých typů motorů a limitující přetlak, při kterém se začínají regulovat otáčky turbodmychadla, je také individuální pro každý motor.

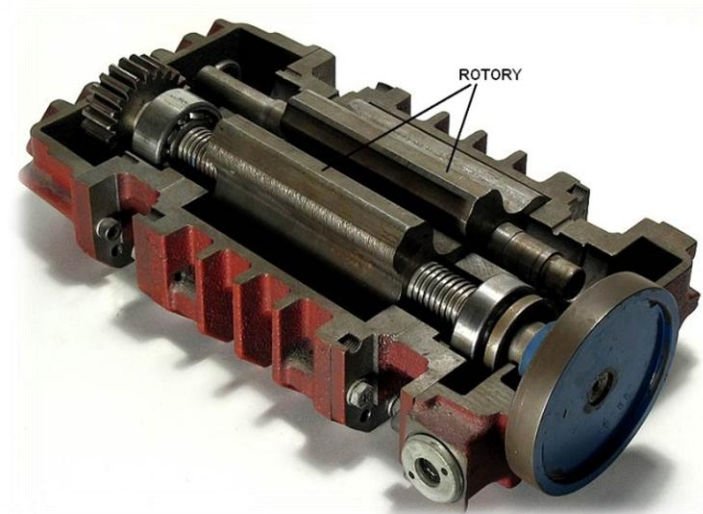
Režim vysokého plnicího tlaku nastává při vysokých otáčkách turbodmychadla a je nutno jej regulovat. Způsoby, jimiž lze regulovat tlak ve válcích, je mnoho a je nutné vybrat správný způsob vzhledem k motoru, konstrukci a plnicím tlakům.

3.2.3 Ostatní principy přeplňování

Turbodmychadlo není jediným principem přeplňování motorů. Používá se také princip mechanického přeplňování. U mechanického přeplňování je dnes nejčastější pohonnou jednotkou ozubený převod od klikové hřídele. Tento princip však odebírá část výkonu, která by mohla být využita k pohonu vozidla.

Velkou výhodou toho principu je účinné přeplňování i při nízkých otáčkách motoru. Studie však ukazují, že mechanické přeplňování má ve srovnání s přeplňováním turbodmychadlem nižší výkonové zisky a měrná spotřeba také zaostává za principem turbodmychadla. Mechanická vazba dmychadla s klikovou hřídelí je také zdrojem hluku. Ve vozidlových motorech se vyskytují různé typy konstrukcí. Mezi nepoužívanější patří Rootsovo, Lysholmovo nebo křídlové dmychadlo. Největší uplatnění našly tyto konstrukce v automobilkách Mercedes a Jaguár. Volkswagen vyvinul motory se spirálovým G-dmychadlem.

Rootsovo dmychadlo je to nepoužívanější zubový kompresor. Patří do skupiny kompresorů s vnější kompresí. Ke stlačení nedochází v pracovním



Obrázek 4: Rootsovo dmychadlo - třízubé

prostoru, ale za ním. Dmychadlo má dva rotory a na každém rotoru většinou bývají tři zuby, ale počet se může lišit. Osy hřídelí rotorů jsou rovnoběžné a rotory jsou navzájem spřažené pomocí synchronizačního soukolí o stejném počtu zubů. Jako kompresory se Rootsova dmychadla používají jednostupňově do tlakového poměru 2, dvoustupňově s mezichladičem do tlakového poměru 3 (3,5). Dělají se i varianty se zakroucenými rotory, tento typ se nazývá Šroubové Rootsovo dmychadlo.

Lysholmovo dmyhadlo je velice podobné šroubovému Roodsovu dmyhadlu, ale rotory jsou více zkrouceny a mají konický úkos. Tyto kompresory mají vnitřní stlačení vzduch, což je činí daleko efektivnější pro vysokotlaké přeplňování.

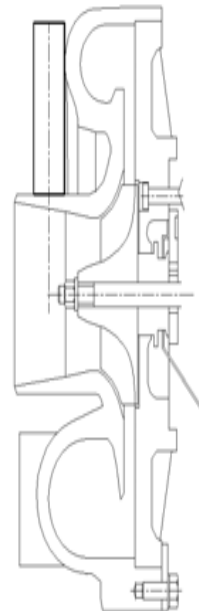
G-kompresor je to lamelový kompresor, který používá rotor s radiálně posuvnými lamelami, který je excentricky uložený ve válci, což je důsledkem vnitřní komprese.

4 Metody měření otáček turbodmychadla

Otáčky turbodmychadla mají veliký význam nejen na dynamiku motoru, ale také na celou soustavu, v níž je turbodmychadlo zabudováno. Je velice důležité znát chování a okamžité otáčky turbodmychadla v průběhu pracovního oběhu daného motoru. Výrobci turbodmychadel nevybavují své výrobky žádnými snímači otáček a tak je nutné používat dodatečné měřicí vybavení. Musíme také brát v potaz, že na rotor turbodmychadla díky vysokým otáčkám nemůžeme umístit žádné těleso. Jakýkoliv zásah do rotoru by byl nežádoucí a to zejména kvůli následnému vyvážení, které by bylo komplikované. Vyvážení jakéhokoliv nevývažku se musí provádět na speciálních vyvažovacích strojích přímo u výrobce. Musí se tedy zvážit princip, kterým se otáčky budou měřit, protože každé řešení není vhodné. A je nutné použít způsob, který nenaruší vyvážení rotoru turbodmychadla.

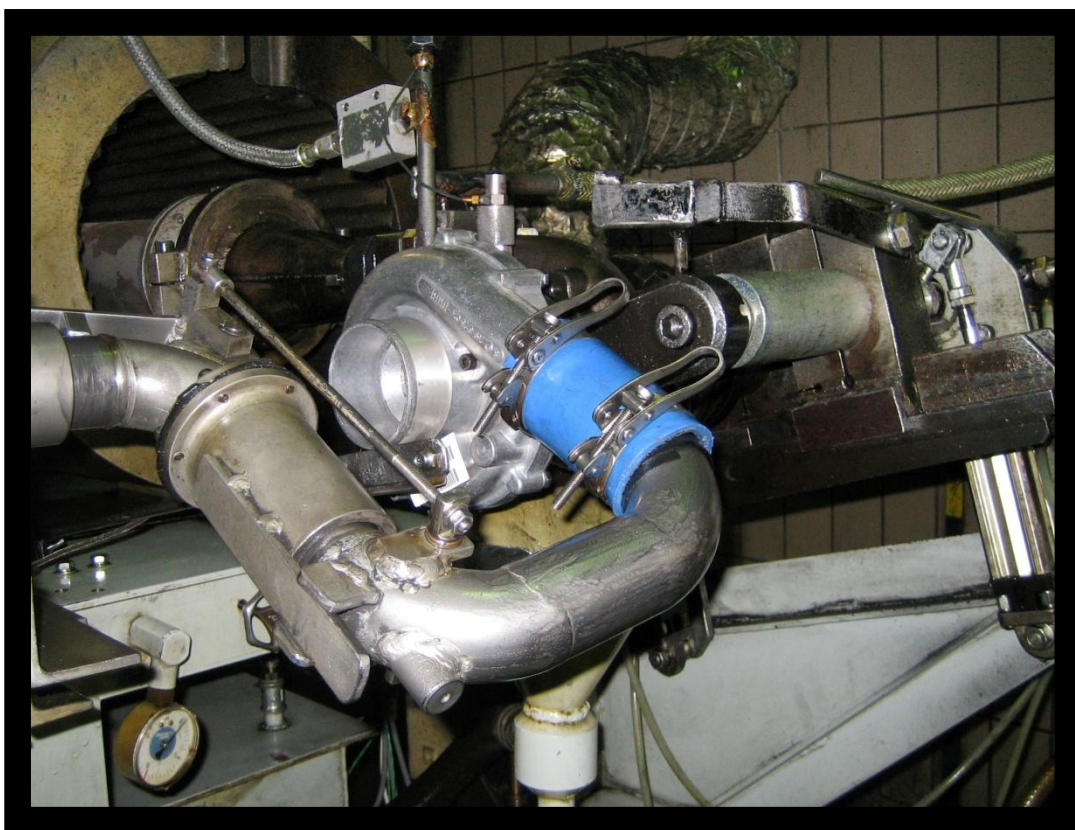
4.1 Měření otáček indukčním snímačem

Jednou z možností jak měřit otáčky turbodmychadla je pomocí indukčního snímače. Indukční snímač se umístí na hrdlo kompresoru co nejbližší k matici kola kompresoru. Matici je nutno zmagnetizovat. Podmínkou je, že matice musí být vyrobena z feromagnetického materiálu. Výstupem je střídavý signál s frekvencí otáček turbodmychadla. Amplituda napětí signálu je však nízká a tak se signál zesiluje a dále převádí na TTL úroveň pro další zpracování digitální čítačovou technikou. Tento způsob se však nedá použít u všech turbodmychadel.



Obrázek 5: Nedostatečné vysunutí matice v nátrubku

Zvláště u menších typů turbodmychadel tento způsob selhává, protože nelze zajistit dostatečně silné magnetické pole v okolí cívky snímače. Také nám může zkomplikovat měření nedostatečné vysunutí matice do vstupního nátrubku. (Obrázek 5). Obrázek 6 je vyfocen ve zkušebně přímo u výrobce turbodmychadel ČZ Turbo ve Strakonici, kde pomocí tohoto způsobu testují všechny typy turbodmychadel do určitých otáček. Tato zkouška je přesná simulace zatížení turba v zástavbě motoru. Na turbínu se vhání stlačený horký vzduch podobných teplot jako jsou výfukové spaliny a hřídel turbodmychadla je tlakově mazaná olejem. Větší průměry turbodmychadel se testují přibližně do 100 000 ot/min a však menší průměry turbodmychadel až do 300 000 ot/min.



Obrázek 6: Zkušebna ČZ Turbo Strakonice

4.2 Měření otáček z vibrací turbodmychadla

Další velmi často používanou variantou je vyhodnocení otáček turbodmychadla z měření vibrací. Toto měření využívá nedokonalosti vyvážení turbodmychadla, kdyby turbodmychadlo bylo dokonale vyvážené toto měření by nebylo možné. Při této zkoušce se používá akcelerometr, který je umístěn na ložiskové skříni turbodmychadla. Harmonickou analýzou signálu z akcelerometru lze vyhodnotit otáčky rotoru turbodmychadla. Tento typ měření je běžně používaný u výrobce turbodmychadel, kdy vibrace jsou jedny z nejvíce sledovaných parametrů. Všechna vyrobená turbodmychadla jsou připevněna na zkušební stoličce a roztočena stlačeným vzduchem, při této zkoušce se sledují vibrace, které nastávají důsledkem nevyvážení. Následně se turbodmychadlo vyváží ubráním materiálu. Výhodou tohoto způsobu měření je, že se nemusejí dělat jakékoliv úpravy skříňe turbodmychadla ani motoru. Snímač vibrací se připevní na skříň turbodmychadla pomocí lepidla.

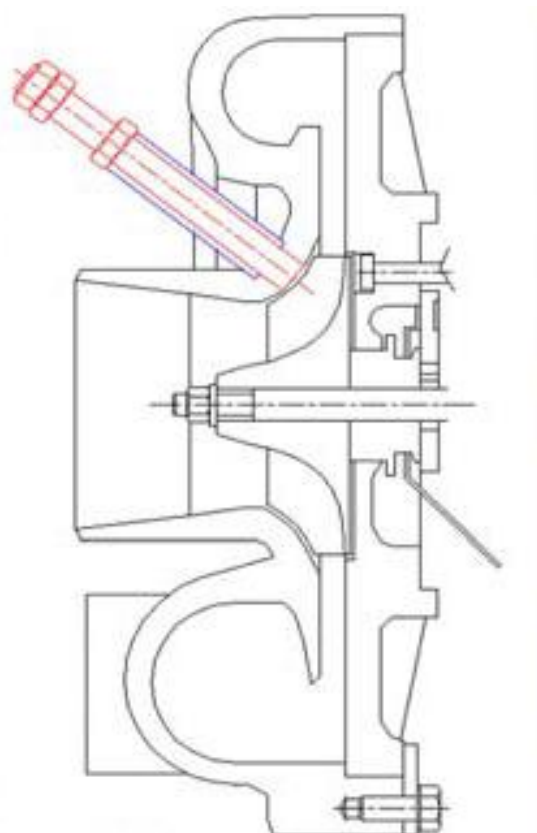
4.3 Měření otáček laserovým snímačem

Toto měření je založeno na optickém reflexním principu. Zařízení se skládá z laserové vysílací a snímací diody a vyhodnocovací elektroniky. Na lopatky kompresoru je nutno udělat reflexní značku, na kterou se zaměří optický vysílač a přijímač. Do vstupní části skříňe kompresoru je nutno vytvořit otvor pro snímač. Nevýhodou tohoto snímacího zařízení je doba trvanlivosti značky na rotujících lopatkách a také je velice důležité nastavení čidla. Velký problém dělají nejen odrazy jednotlivých rotujících lopatek, které jsou v jedné výškové úrovni, ale také lopatky, které jsou zapuštěné hlouběji. Tato metoda není často využívána a to z důvodu nutnosti odstranění sacího ústrojí při měření turbodmychadla v zástavbě motoru. Sací potrubí se musí odstranit a to z důvodu, aby laserový snímač mohl být nastaven na reflexní značku, která již od výrobce bývá na jedné z lopatek turbodmychadla.

nebo na utahovací matici. Další nevýhodou jsou vibrace motoru, které mohou způsobit ztracení kontaktu snímače se značkou. Nevýhodou laserového snímače je frekvenční omezení cca 200 000 pulzů za minutu.

4.4 Měření otáček snímačem na principu vířivých proudů

Měření otáček snímačem na principu vířivých proudů je metoda založena na principu snímání pohybu lopatek turbodmychadla. Vysokorychlostní snímač reaguje na průchod elektricky vodivých kompresorových lopatek. Změna vířivých proudů způsobuje změnu impedance na měřicí cívce a následně změnu elektrického signálu. U této metody se dají měřit otáčky až do 400 000 ot/min. Snímač musí být připevněn tak, aby byl jeho konec zarovnan s vnitřním povrchem kompresorové skříně (obrázek 7) a byly tak splněny předepsané vzdálenosti mezi snímačem a lopatkami (0,1 až 0,5 mm). Nevýhodou tohoto měření je, že při vyšších otáčkách může dojít ke ztrátě signálu. Toto je většinou způsobeno nedodržením předepsané vzdálenosti sondy od rotujících lopatek, vlivem axiálního posunu turbodmychadla při vyšších otáčkách.



Obrázek 7: Připevnění snímače vířivých proudů

4.5 Měření otáček analýzou zvuku

U tohoto měření se využívá také nedokonalosti výroby jako u měření vibrací. Zde hraje velikou roli nedokonalé vyrobení lopatek turbodmychadla, díky tomu turbodmychadlo s nárůstem otáček začne vydávat zvuk určité frekvence. Díky frekvenční analýze dokážeme bezpečně rozeznat zvuk turbodmychadla od ostatních hlučných částí motoru. Zvuk se měří mikrofonom v blízkosti turbodmychadla, který je připojen na analyzátor PULSE. Analyzátor vyhodnocuje analogový, který je dál zpracován v počítači pomocí programu Labshop.

5 Návrh měření otáček turbodmychadla pomocí analyzátoru PULSE

5.1 Analyzátor PULSE

Analyzátor PULSE byl vyvinut zejména pro měření hluku a vibrací. Má však daleko rozšířenější využití. Zařízení zpracovává veškerý obecný analogový signál a pomocí software LabShop umožňuje provádění frekvenčních a časových analýz. K analyzátoru můžeme připojit různé druhy snímačů, jedinou podmínkou je, aby vstupní signál byl analogový. Analyzátor je vybaven několika vstupy pro připojení snímačů, což nám umožňuje měřit několik veličin současně.



Obrázek 8: Analyzátor PULSE

Například můžeme sledovat vibrace pomocí snímače připevněného na měřeném objektu, zároveň měřit zvuk pomocí mikrofону a také současně sledovat otáčky optickým snímačem. Pro vyhodnocení je velice důležité nastavení jednotlivých analýz v programu Labshop. V programovém prostředí, lze jednotlivé typy měření nastavit samostatně včetně způsobu zobrazení výsledků. Nejčastěji bývají výsledky zobrazeny formou spekter nebo multispekter.

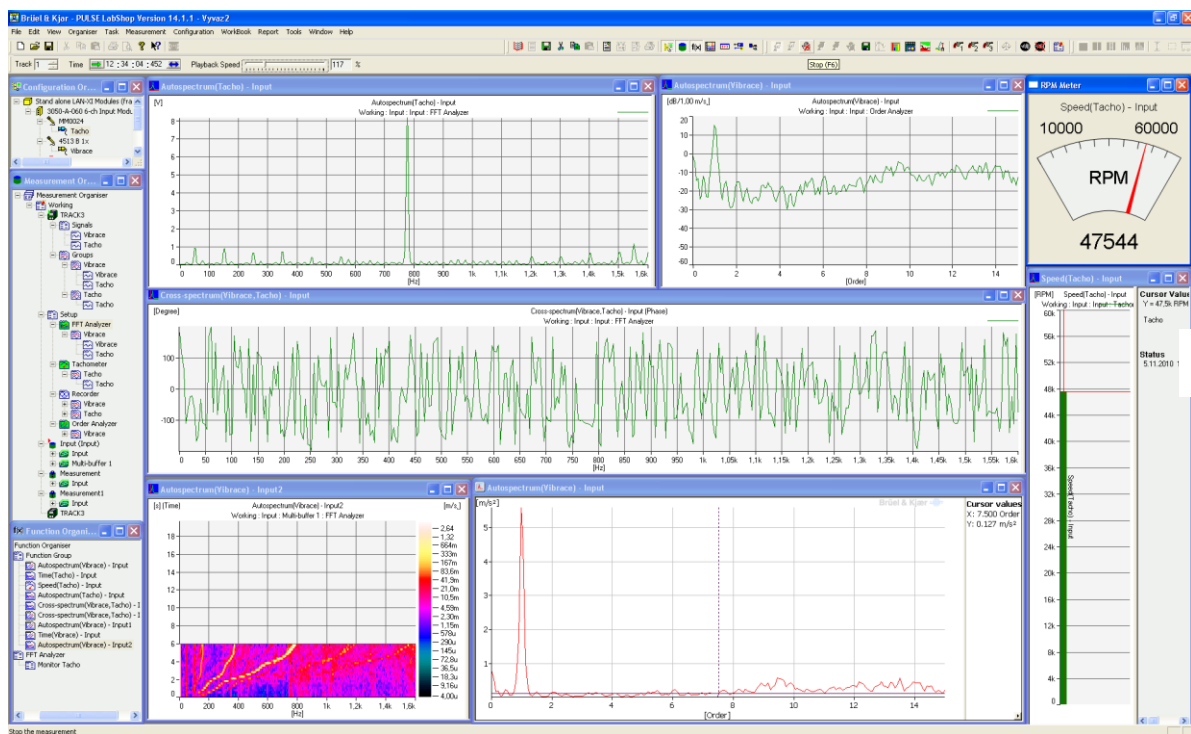
5.2 Použití analyzátoru PULSE u jednotlivých způsobů měření otáček

Analyzátor PULSE využijeme ve všech navržených způsobech měření otáček turbodmychadla. Výsledky se vyhodnocují v programu. Díky FFT analýze dokážeme bezpečně určit zdroj zvuku a vibrací a tak vyhodnotit otáčky turbodmychadla. FFT (Fast Fourier Transformation - rychlá Fourierova transformace) analýza rozkládá periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů.

Při měření optickým a indukčním snímačem budeme používat k vyhodnocení Řádovou analýzu. Při měření vibrací a zvuku budeme, vzhledem k nemožnosti synchronizace otáček, používat pouze Fourierovu transformaci. Na vyhodnocování nemusíme použít jen Fourierovy transformace, můžeme tato měření vyhodnocovat i ze snadno rozlišitelné hodnoty výchylky, která se opakuje periodicky. Počet těchto výchylek za určitý časový úsek se rovná stejnému počtu otáček za stejnou dobu. Tento způsob je relativně časově náročný a vyžaduje určité zkušenosti s orientací ve složitých vibračních časových záznamech.

6 Provedené zkoušky na jednotlivých stanovištích v laboratořích KVM a ČZ Turbo Strakonice

Měření navrženými způsoby jsme prováděli v laboratořích KVM a ve firmě ČZ Turbo Strakonice. Zkoušky prováděné ve Strakonických nebyly prováděny na běžícím motoru, ale na zkušební stolici a turbodmychadlo bylo poháněno horkým vzduchem. Na zkušební stolici se prováděly tři navrhované způsoby měření a to laserovým snímačem, vibrační metodou a indukční metodou. V laboratořích KVM byly provedeny dva způsoby měření, vibrační metoda a měření zvuku na v zástavbě běžícího motoru. Pro vyhodnocení měření jsme použili Analyzátor PULSE a program LabShop. Prostředí programu PULSE LabShop je zobrazeno na obrázku 9. Je zde znázorněn průběh měření a vznik spekter a multispekter ze signálu od jednotlivých snímačů, které jsou zpracovávány FFT a TTL transformacemi.



Obrázek 9: Programové prostředí PULSE LabShop

Měření otáček snímačem na principu vířivých proudů jsme neprováděli z důvodu komplikovaného zapojení snímače. Tento způsob vyžaduje zásah do skříně kompresoru a přesné podmínky měření, které by bylo velice obtížné zajistit. Způsob metodou vířivých proudů je vyhovující spíše pro motory, které jsou v laboratořích trvale zapojeny z důvodu znehodnocení skříně turbodmychadla.

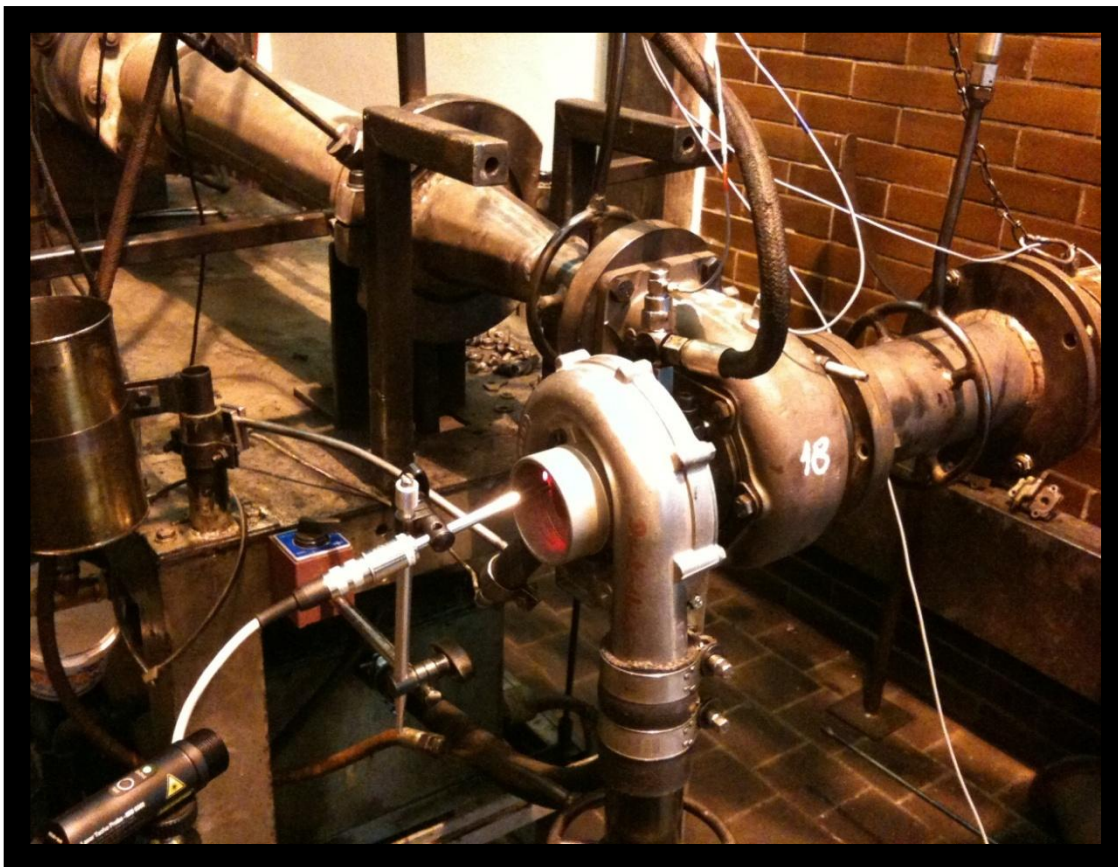
6.1 Zkoušky prováděné v ČZ Turbo Strakonice

Měření otáček turbodmychadla probíhalo na zkušební stoličce poháněné vzduchem. Mazání hřídele turbodmychadla se provádělo protékajícím olejem. Čerpadlo oleje bylo jediným zdrojem vibrací, které by mohlo zkreslovat měření vibrační metodou. Podmínky jednotlivých měření byly na zkušební stoličce ideální. Naměřená data, která jsou zobrazena níže ve spektrech, multispektrech a časových průbězích jsou naměřena současně při jednom měření.

Měření laserovým snímačem bylo provedeno snímačem značky B&K typ MM-0360. Snímač byl umístěn na stativu přibližně 40 cm od snímaného objektu. Laserový paprsek jsme nastavili na značku, která byla vyznačena reflexní barvou na lopatce dmychadla. Měření je zobrazeno na obrázku 11, jsou zde vidět dva laserové snímače. Použitý snímač MM-0360 pro naše měření se nachází v levé spodní části obrázku 11, který je namířen na měřené dmychadlo. Dopad laserového paprsku na lopatku, je vidět na obrázku 10 a

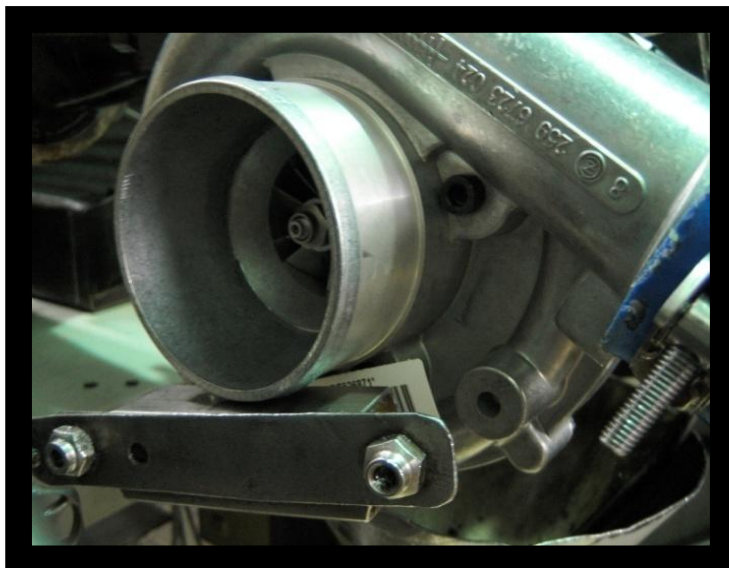


znázorňuje ho malá laserová značka ve spodní části dmychadla. U této metody je důležité přesné nastavení laseru na snímanou značku a zemezení pobybu stativu, na kterém je umístěn snímač.



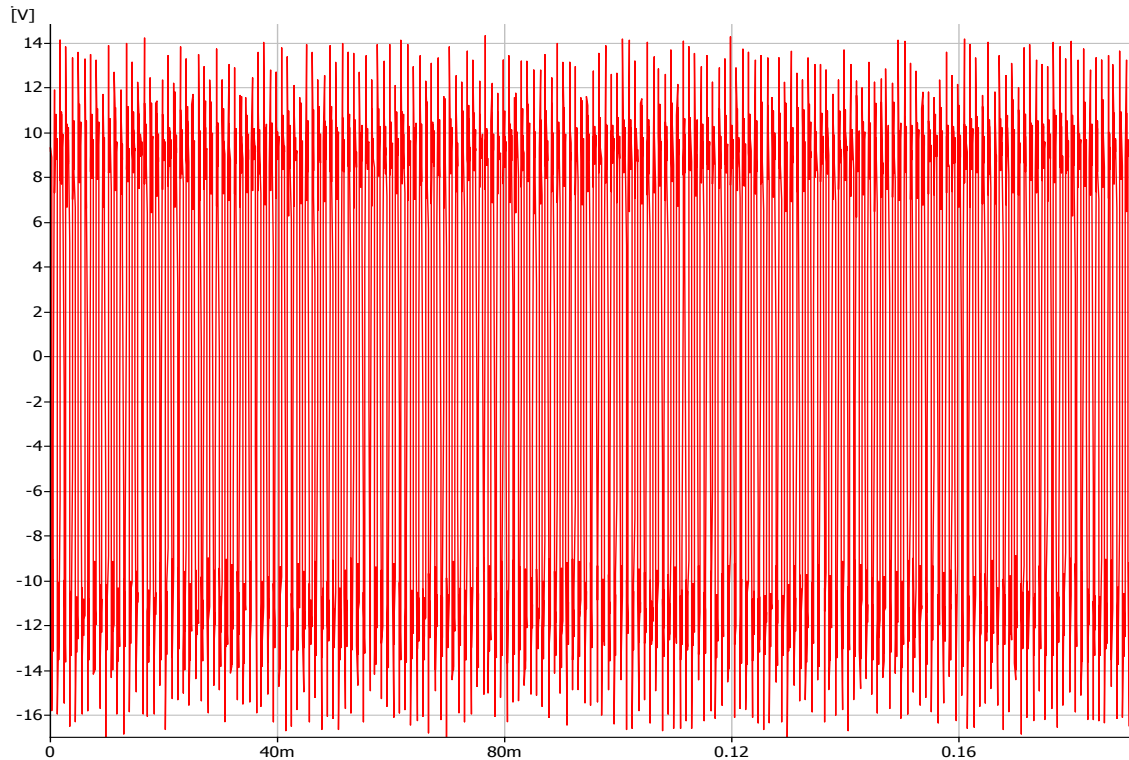
Obrázek 11: Měření laserovým snímačem

Měření otáček indukčním snímačem je znázorněno na obrázku 12. Utahovací matici dmychadla je nutno zmagnetovat speciálními kleštěmi, které jsou tvořeny ze dvou silných magnetů. Přiložením kleští k matici dmychadla zajistíme dostatečné zmagnetování. Ke skříni turbodmychadla umístíme indukční snímač, tak aby byl co nejbližší k utahovací matici.



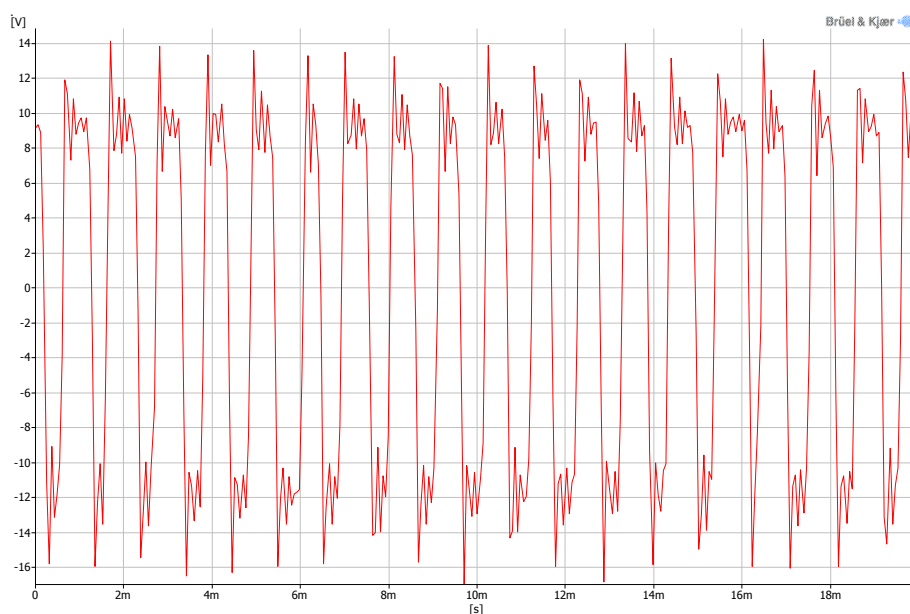
Obrázek 12: Měření indukčním snímačem

Snímač snímá měnící se póly magnetu a program PULSE LabShop nám zpracovává výsledný signál, který byl zesílen cca $\pm 10V$. Časový průběh toho měření je



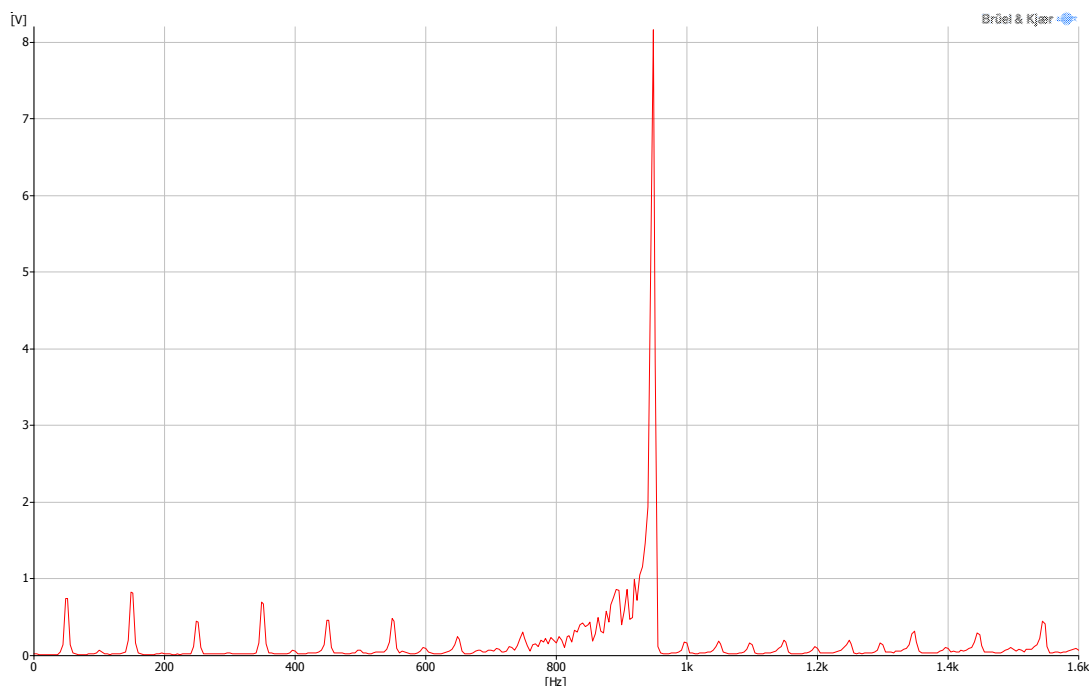
Obrázek 13: Časový průběh měření

na obrázku 13, je zde vidět jak se střídá severní a jižní magnetický pól z magnetované utahovací matice dmychadla.



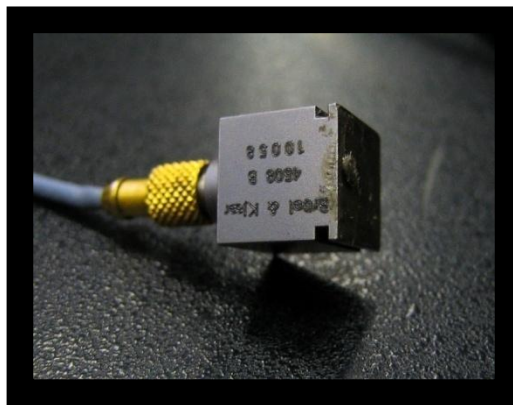
Obrázek 14: Časový průběh měření – zvětšený výřez z obrázku 13

Na obrázku 15 je spektrum indukčního měření vytvořené pomocí FFT analýzy v programu PULSE LabShop a špička nejvyšší amplitudy má hodnotu 948 Hz.

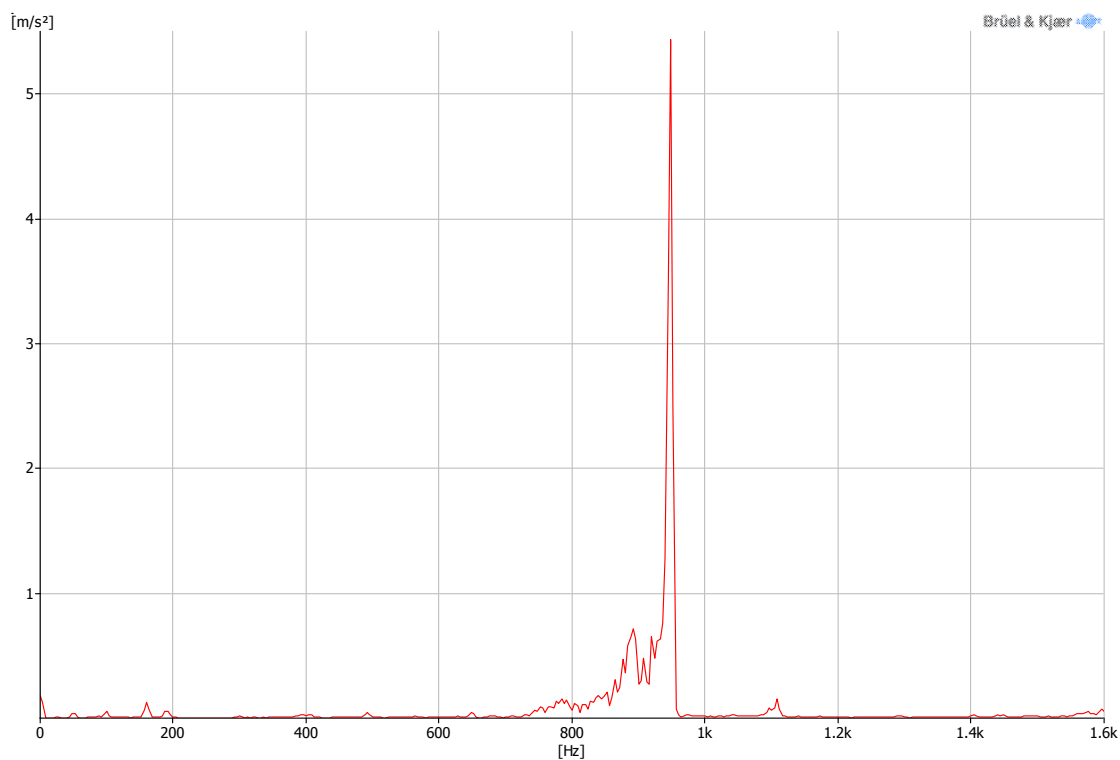


Obrázek 15: Spektrum indukčního měření

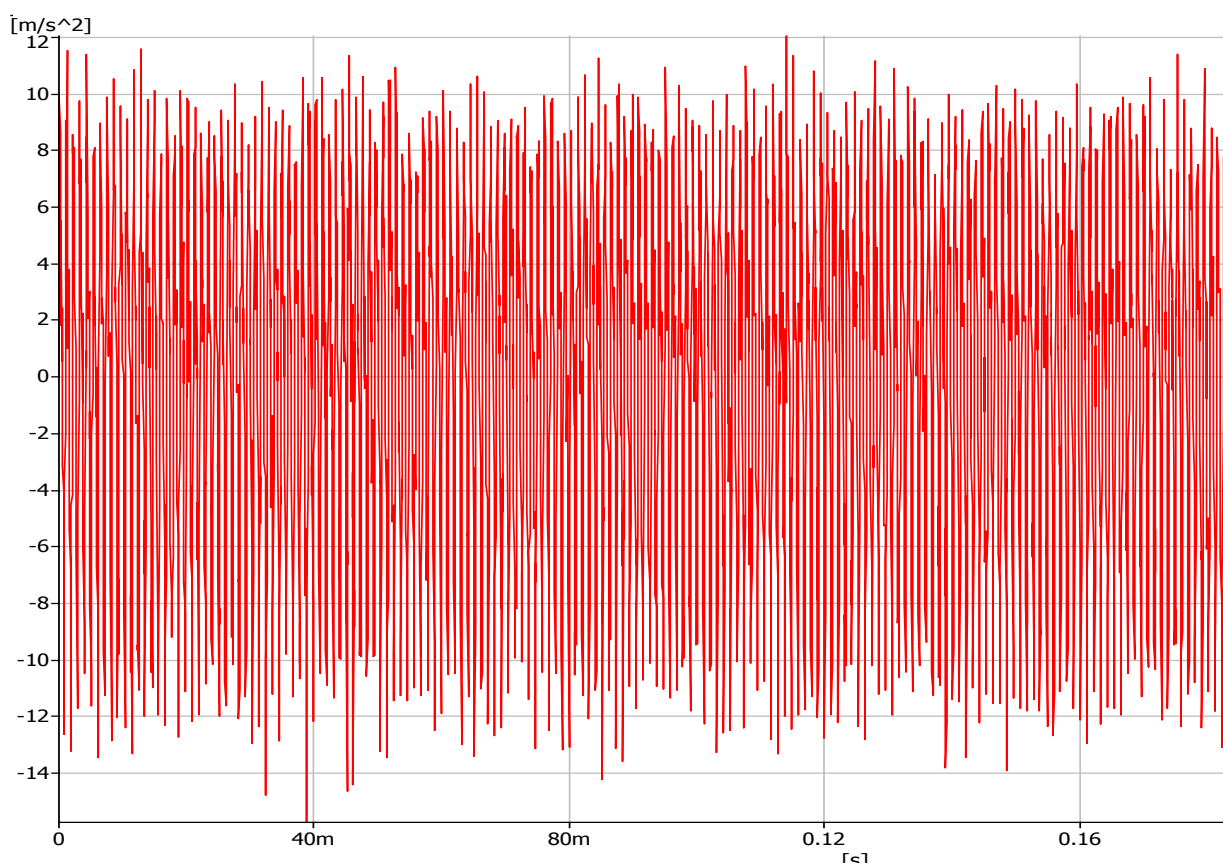
Měření otáček vibrační metodou bylo prováděno snímačem značky B&K typ 4508 B, který je na obrázek 16. Držáček snímače byl připevněn na skříň turbodmychadla s použitím lepidla. Do držáčku byl následně vložen snímač vibrací. Snímač zachycuje vibrace při otáčkách turbodmychadla a program PULSE LabShop vyhodnocuje tyto vibrace FFT transformací. Vyhodnocená data se nám zobrazují ve spektru vibrací (obrázek 17). Na tomto obrázku můžeme vidět špičku amplitudy, která nám ukazuje hodnotu vibrací turbodmychadla při určitých otáčkách. Průběh vibrací je znázorněn na obrázek 18.



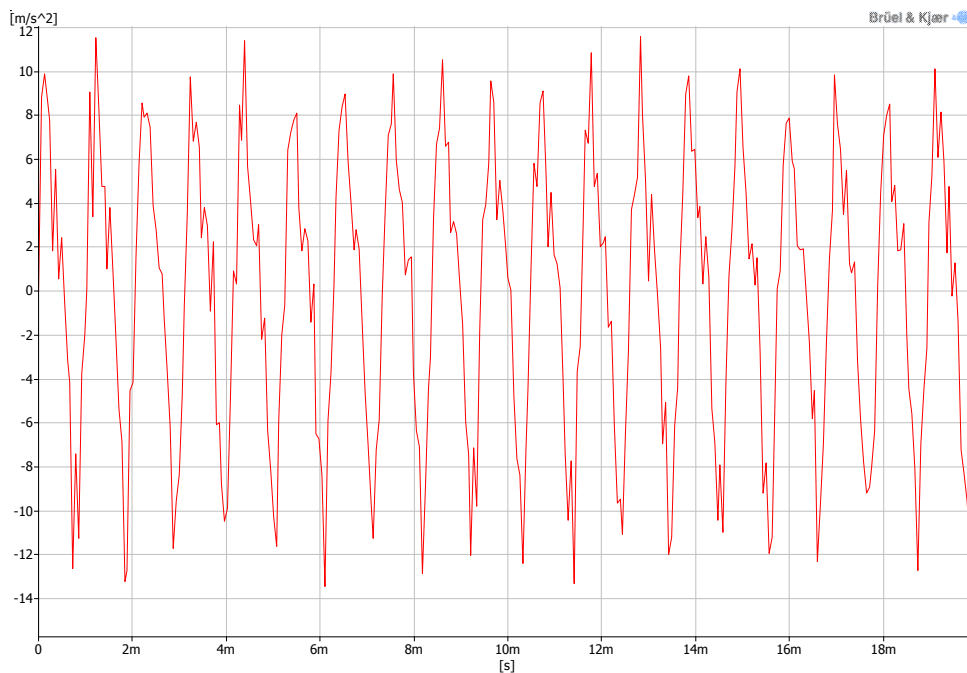
Obrázek 16: Vibrační snímač 4508 B



Obrázek 17: Spektrum vibrací

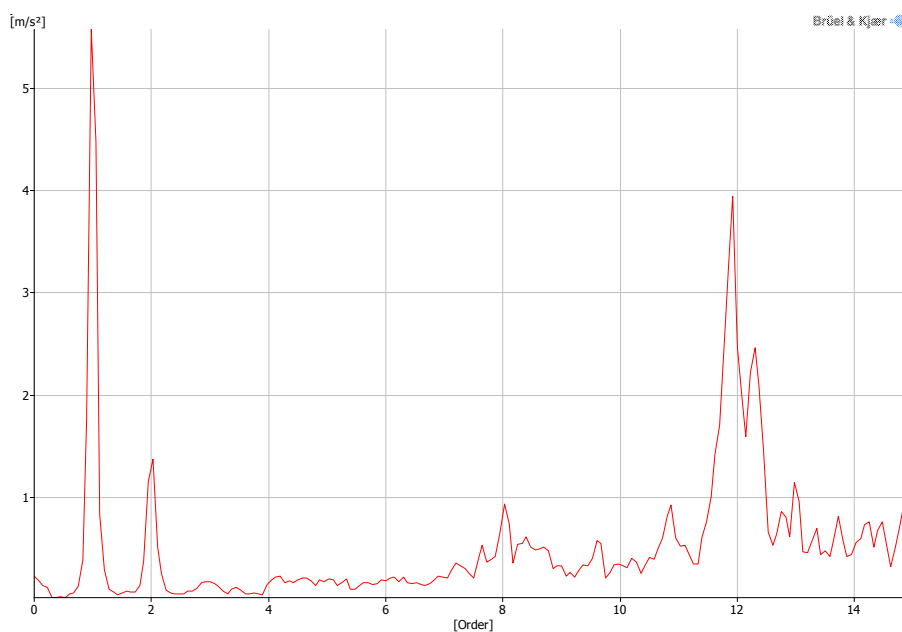


Obrázek 18: Časový průběh vibrací



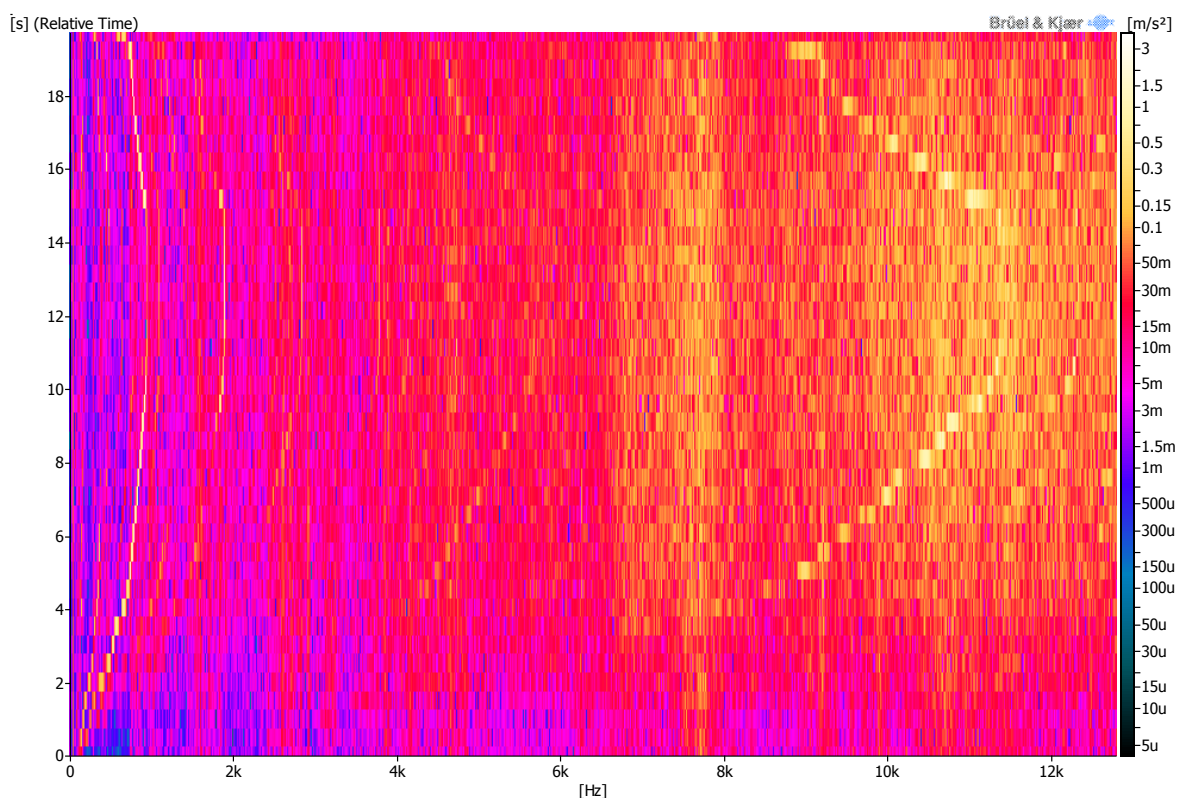
Obrázek 19: Časový průběh vibrací- zvětšený výřez z obrázku 18

Vibrační metoda se také často vyhodnocuje řádovou analýzou. Řádová analýza je obdobná transformace jako FFT, ale je synchronizována s otáčkami, které jsou reprezentovány prvním řádem. První řád znázorňuje vibrace na otáčkové frekvenci, druhý řád udává problém s uložením hřídele a dvanáctý řád znázorňuje vibrace způsobené lopatkami. Z důvodu zaznamenávání vibrací každé lopatky kompresoru, který má dvanáct lopatek. Když má kompresor šest velkých a šest malých lopatek objevuje se špička v řádové analýze ještě na šestém řádu. Řádovou analýzou můžeme zaznamenat spektrum (obrázek 20) a multispektrum (obr. 21), které znázorňuje barevné rozlišení jednotlivých frekvencí.

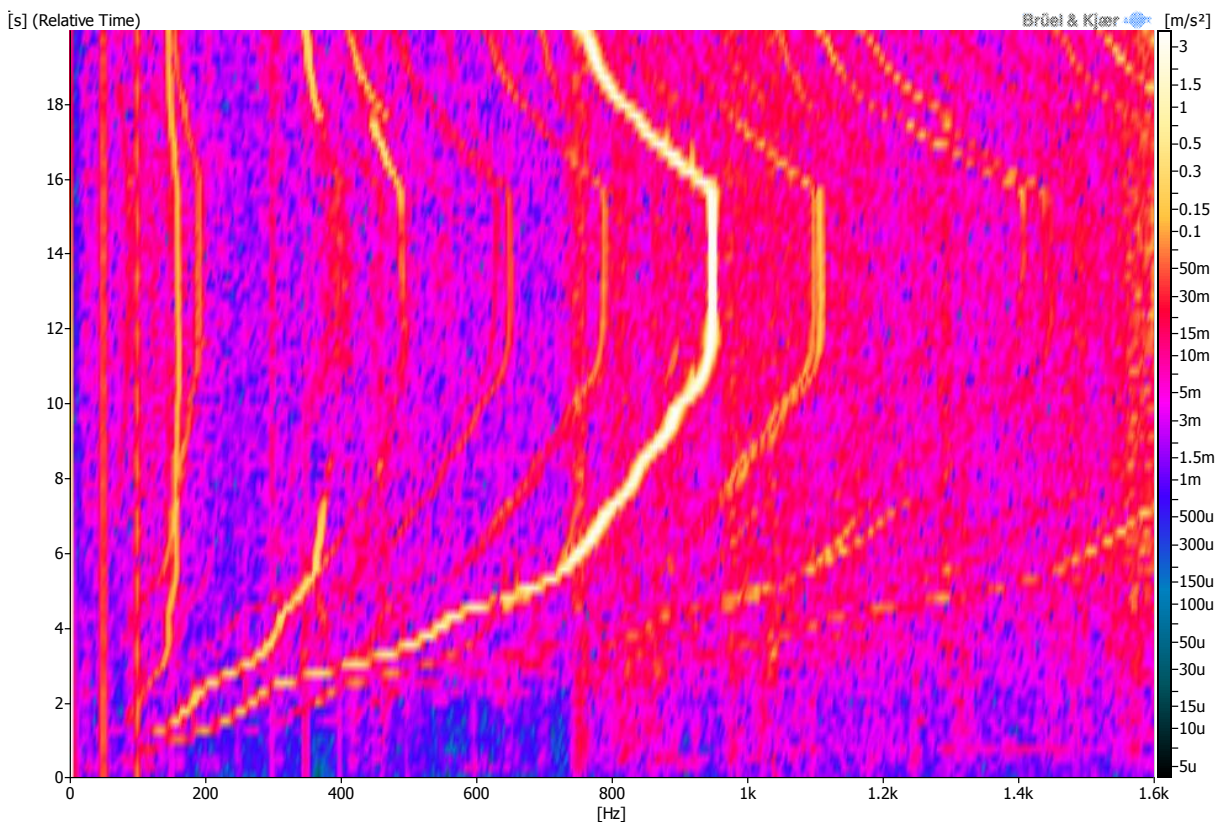


Obrázek 20: Řádová analýza

Nejdůležitější pro vyhodnocení výsledků je hodnota v prvním řádu, která je vidět na multispektru (obrázek 22). Multispektrum znázorňuje, postupné zrychlování turbodmychadla a následný skokový pokles rychlosti přibližně v šestnácté sekundě.



Obrázek 21: Multispektrum FFT



Obrázek 22: Multispektrum FFT- zvětšená křivka prvního řádu

6.2 Zkoušky prováděné v laboratořích KVM

V laboratořích KVM byly zkoušky provedeny na stanovišti motoru Cummins (4,2i, čtyřválec s vstřikováním comonrail), který je vybaven turbodmychadlem typu IB4E. Dále na stanovišti motoru Zetor 1505 (řadový, stojatý čtyřválcový motor, 4,156i) vybaven turbodmychadlem C14-176. Obě turbodmychadla mají 12 lopatek. V laboratořích KVM jsme provedli měření z vibrací a zvuku turbodmychadla.

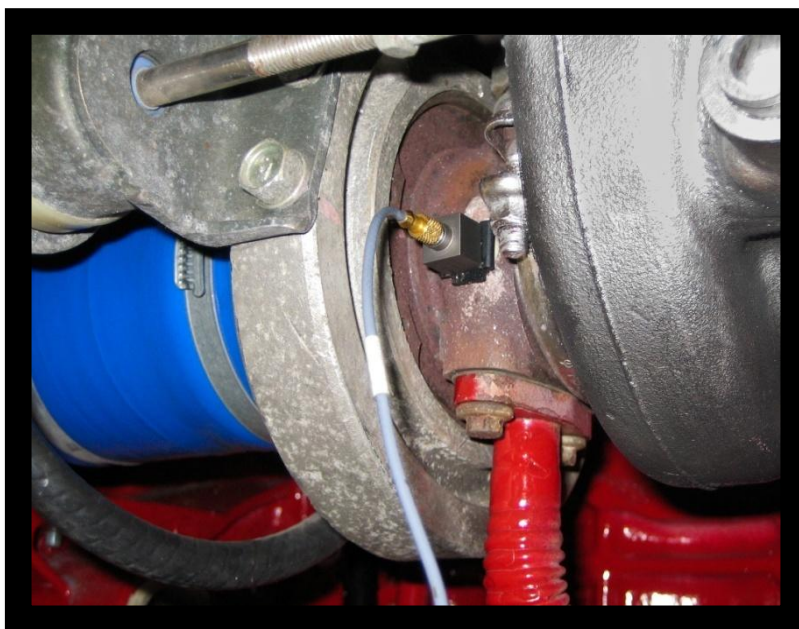
6.2.1 Měření na stanovišti motoru Cummins

Na skříň turbodmychadla jsme připevnili vibrační snímač značky B&K typ 4508 B, který jsme již použili v předchozím měření. Vedle motoru jsme umístili stativ s mikrofonom (obrázek 23) značky B&K ve vzdálenosti 30 cm. První zkouška probíhala při 1500 ot/min motoru s proměnným momentem od hodnoty 11Nm až po 300Nm. Při tomto měření jsme naměřili hodnoty, které jsou zobrazeny na obrázcích 25, 26, 27. Na obrázku 25 vidíme vibrační multispektrum se zřetelnou



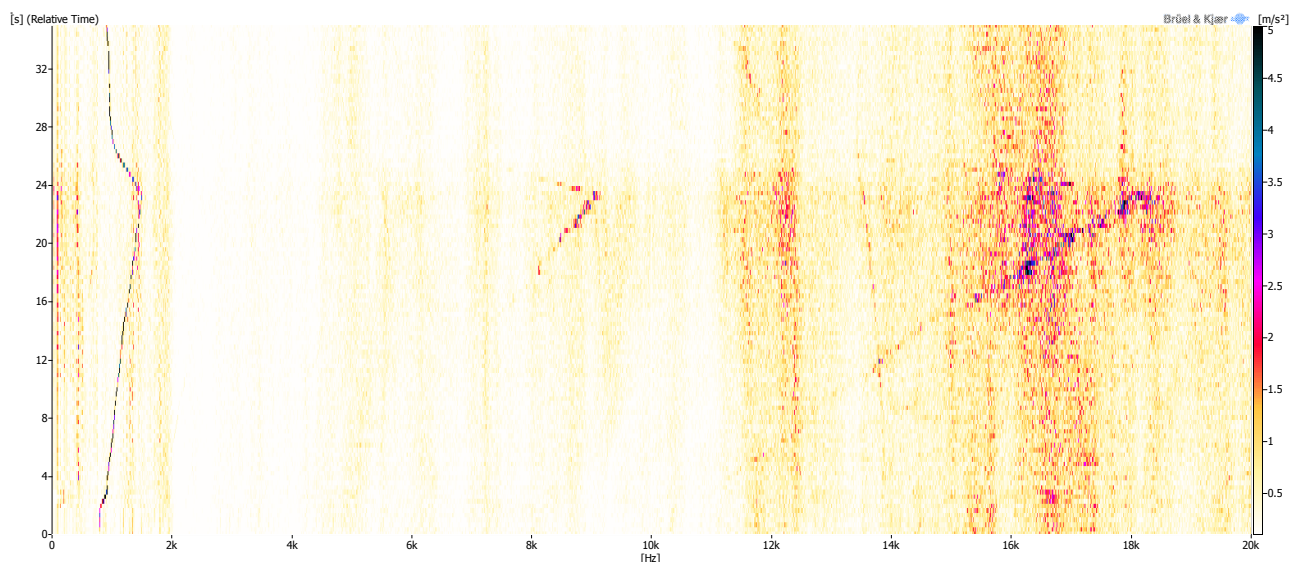
Obrázek 23: Mikrofon

křivkou v celém rozsahu měření na hodnotě 1 kHz. Tato amplituda nám znárodňuje přesné otáčky kompresoru. V tomto multispektru je také výrazná křivka, která je se začíná objevovat přibližně od 12 kHz a svůj vrchol má v 16 kHz, kde otáčky turbodmychadla jsou největší. Tato křivka znázorňuje vibrace 12- ti lopatek, které má kompresor. Kompresor má šest malých a šest velkých lopatek, toto se



Obrázek 24: Měřící stanoviště Cummins – vibrační snímač

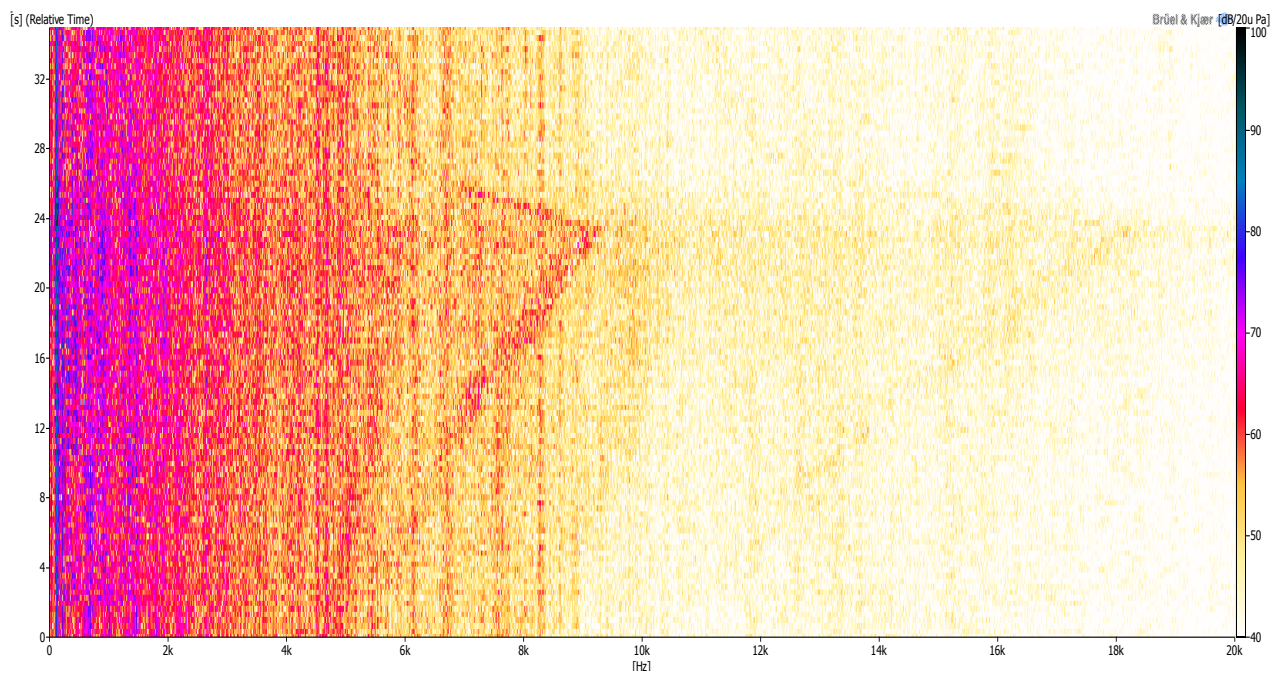
v multispektru projevilo na 6 kHz. Zde se objevuje náznak křivky, což jsou vibrace od 6- ti lopatek, které se projevily až při největším zatížení.



Obrázek 25: Vibrační multispektrum

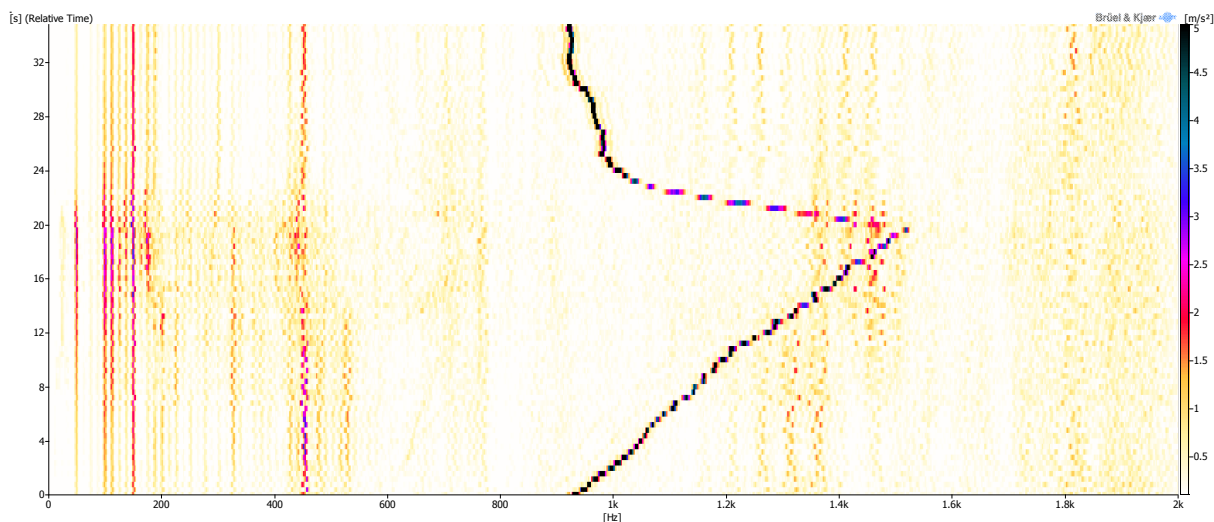
Výsledky z měření zvuku při tomto zatížení motoru jsou znázorněny na obrázku 26.

Zvuk turbodmychadla byl velice nízký, proto křivky ve zvukovém multispektru nejsou dobře čitelné. Nejvýraznější křivkou je křivka na 6 kHz, z čehož lze usuzovat, že největší hluk vzniká na 6- ti lopátkách turbodmychadla. Nedokážeme však přesně určit, na které sérii 6- ti lopatek zvuk vzniká.



Obrázek 26: Zvukové multispektrum

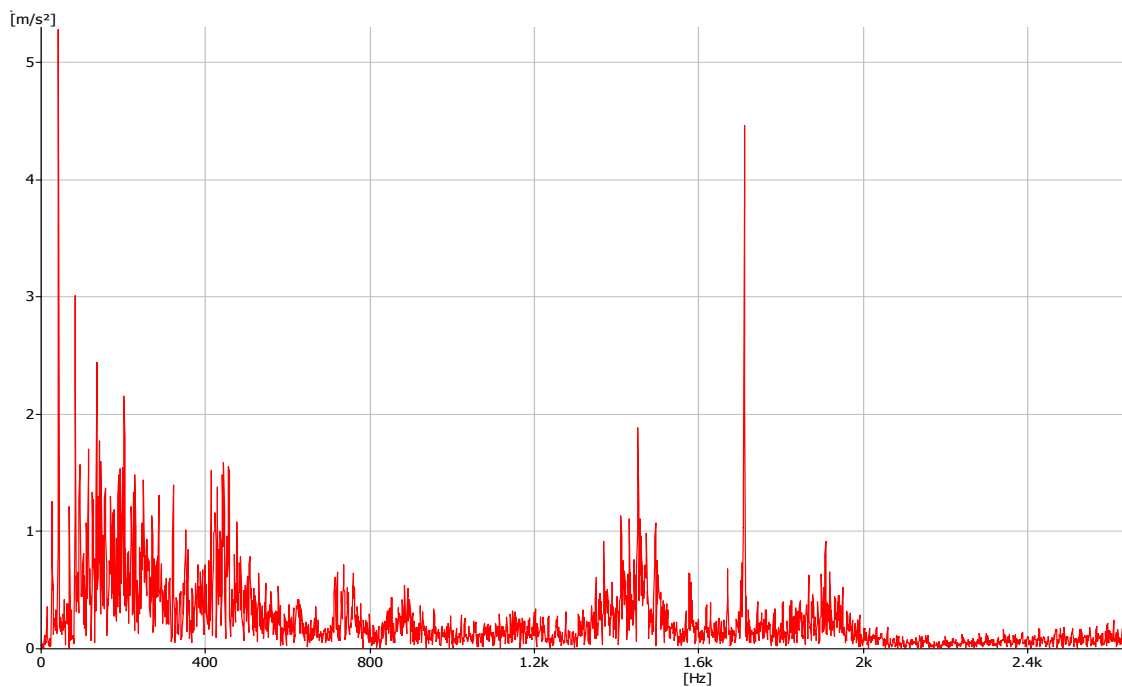
Pro vyhodnocení otáček kompresoru použijeme výsledky z měření vibrací. Výsledky z měření zvuku nejsou dostatečně viditelné, což by ovlivňovalo přesnost měření.



Obrázek 27: Vibrační multispektrum – zvětšená křivka prvního řádu

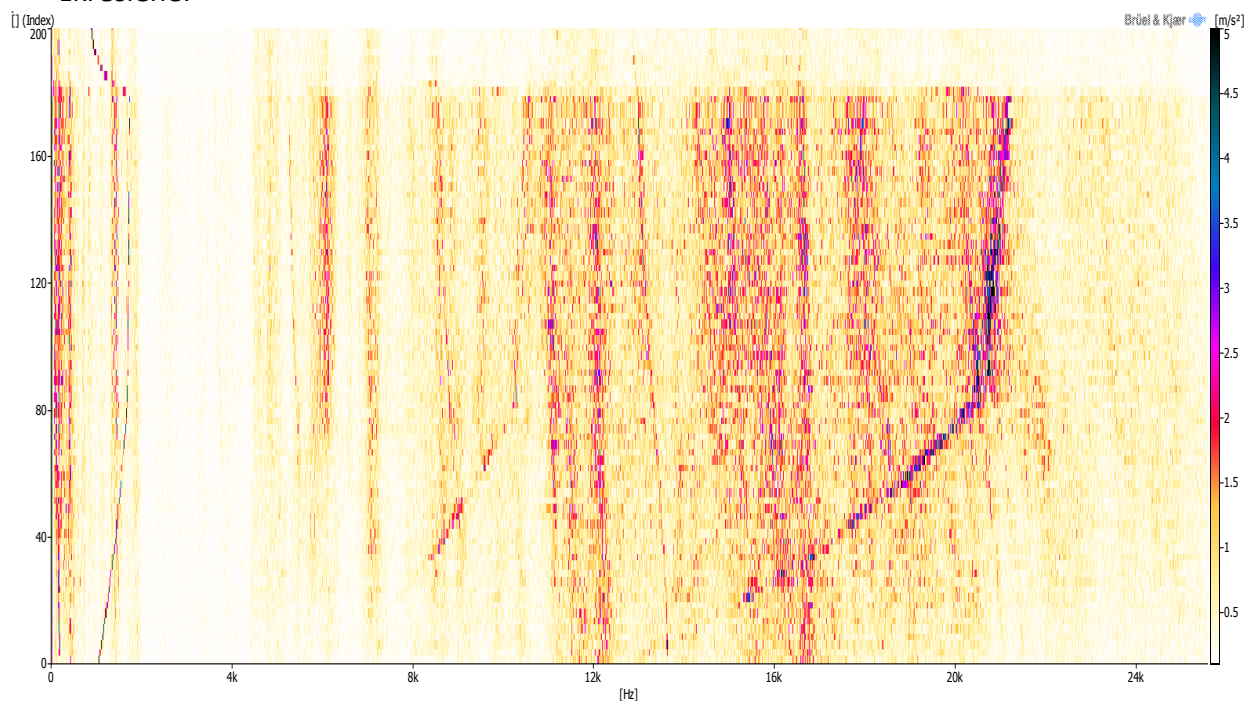
Zvětšením amplitudy (obrázek 27) na hodnotě 1 kHz můžeme přesně odečítat hodnoty otáček při určitém zatížení motoru. Na obrázku zřetelně vidíme konstantně narůstající otáčky kompresoru a následně při ubrání výkonu motoru otáčky kompresoru skokově klesají.

Druhé měření, které bylo provedeno na motoru Cummins probíhalo při 1250 ot/min a s proměnným momentem od 0 do maximálního zatížení, při kterém jsme naměřili 650 Nm. Obrázky 28, 29, 30 znázorňují průběh a výsledky měření při tomto zatížení motoru. Obrázek 28 nám ukazuje časový průběh vibrací ve vibračním spektru. Velice zřetelná je amplituda prvního otáčkového řádu na hodnotě 1 kHz, která je dobře viditelná na obrázku 29.



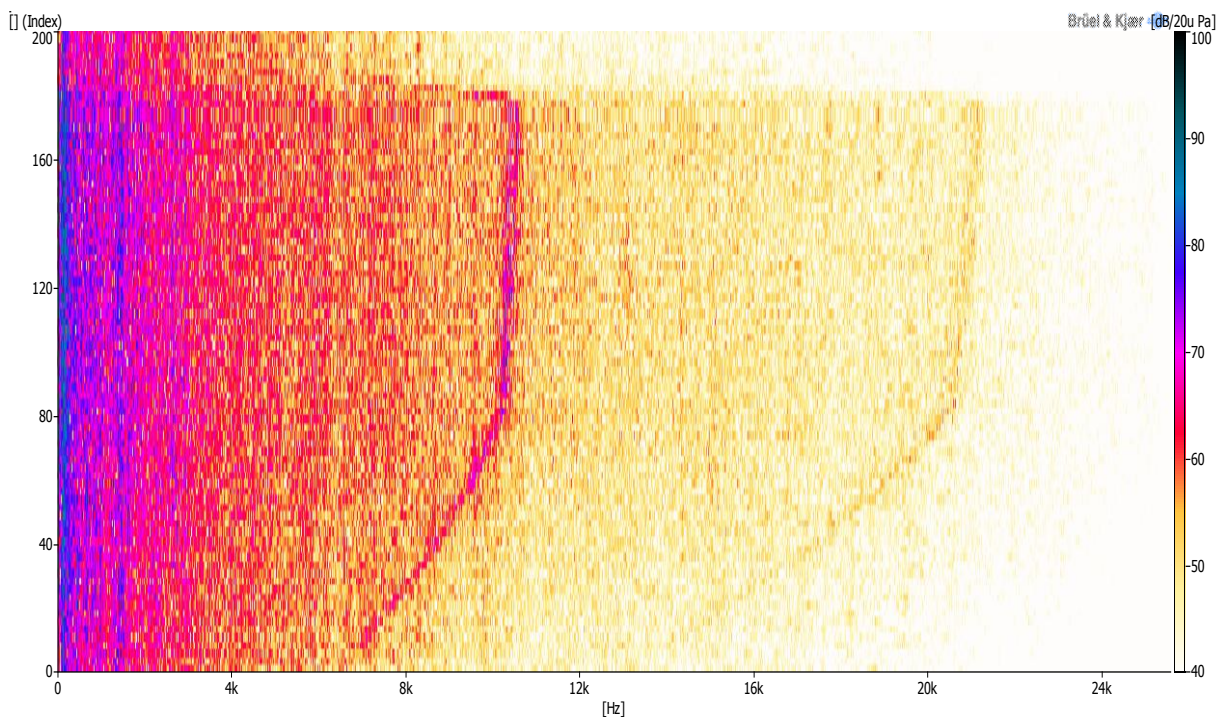
Obrázek 28: Spektrum vibrací - časový průběh

Objevují se nám zde i křivky od dvanáctého otáčkového řádu, které znázorňují vibrace od všech lopatek kompresoru. Vidíme zde i vibrace od šestého otáčkového řádu začínající přibližně na hodnotě 6 kHz. U měření vibrací musíme dát pozor na zpracovávání naměřených hodnot do 10 kHz, pak už mohou být amplitudy zkreslené.



Obrázek 29: Vibrační multispektrum

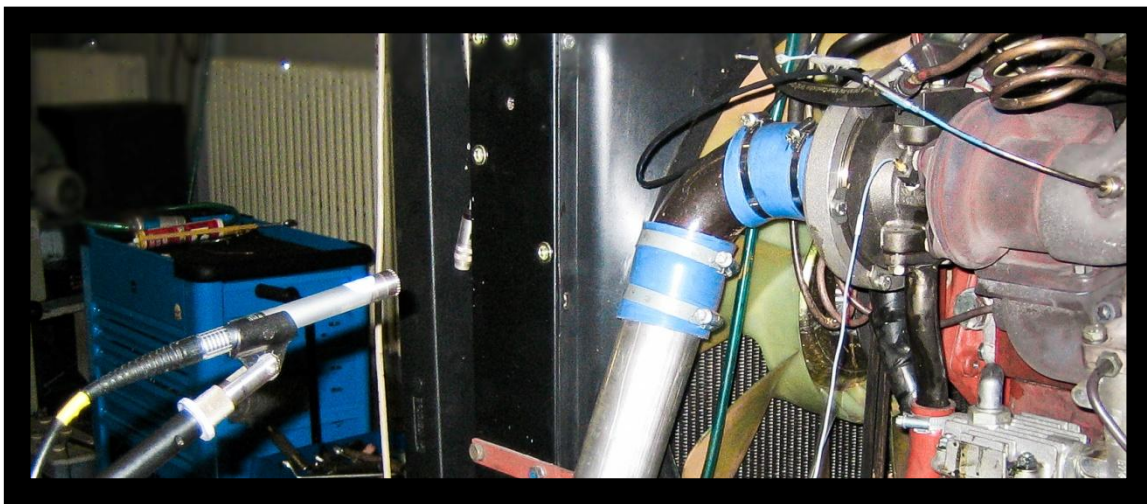
Obrázek 30 vykresluje zvukové multispektrum v průběhu měření. Jsou zde velice dobře rozpoznatelné jednotlivé otáčkové řády. Index na levé ose multispektra udává krok 0,1 s. Při vyhodnocování otáček z hodnot tohoto multispektra musíme dát pozor na šířku vyznačené křivky. U vibračního multispektra je tato křivka užší a proto je výhodné vyhodnotit otáčky kompresoru opět z hodnot naměřených vibračním snímačem.



Obrázek 30: Zvukové multispektrum

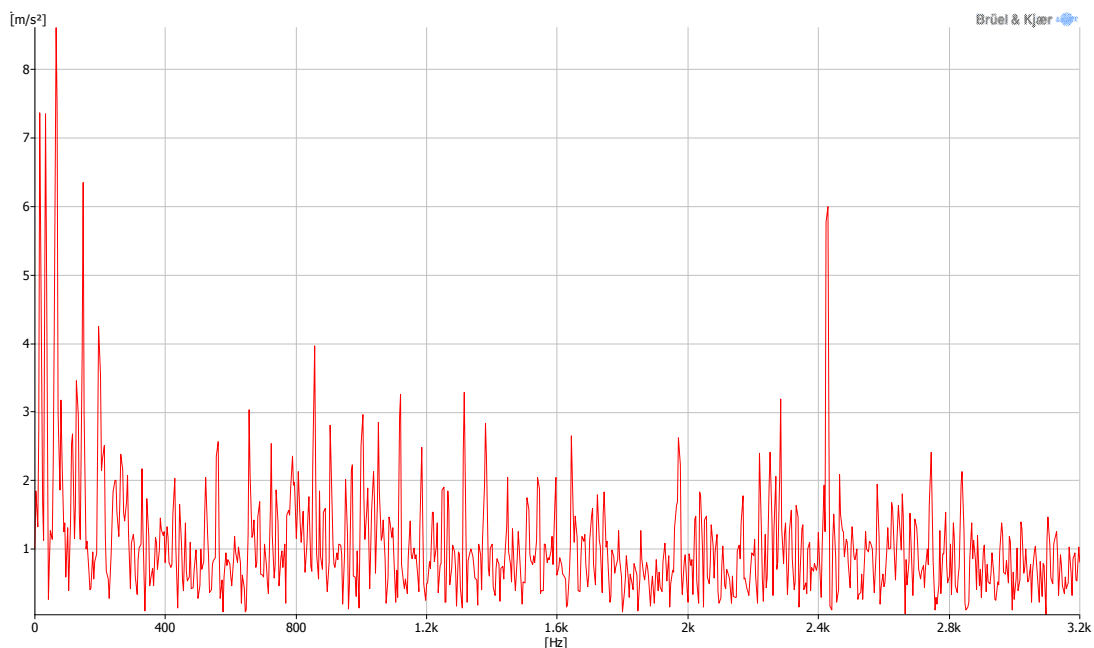
6.2.2 Měření na stanovišti motoru Zetor

Snímač vibrací byl připevněn na skříň turbodmychadla a mikrofon byl ve vzdálenosti 40 cm od měřeného turbodmychadla, viz obrázek 31. Při měření na motoru Zetor jsme se zjistili, že tento motor má veliké vibrace. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázcích 32, 33, 34,35.



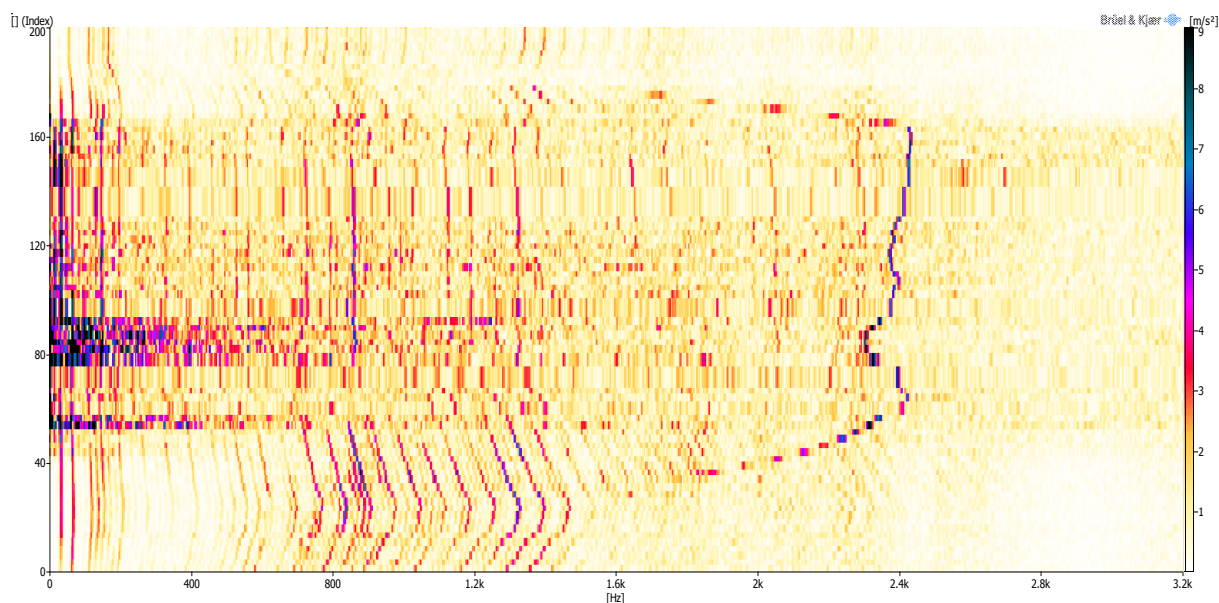
Obrázek 31: Záznam měření na stanovišti motoru Zetor

Na obrázku 32 je znázorněno vibrační spektrum. Velice zajímavé u tohoto měření je vibrační multispektrum (obrázek 33), ve kterém se objevila křivka začínající zhruba na 10 kHz. Tato křivka znázorňuje vibrace od lopatek turbíny nikoliv kompresoru. Je zde také vidět, že křivka na dvanáctém otáčkovém řádu se dostala mimo měřicí úsek.

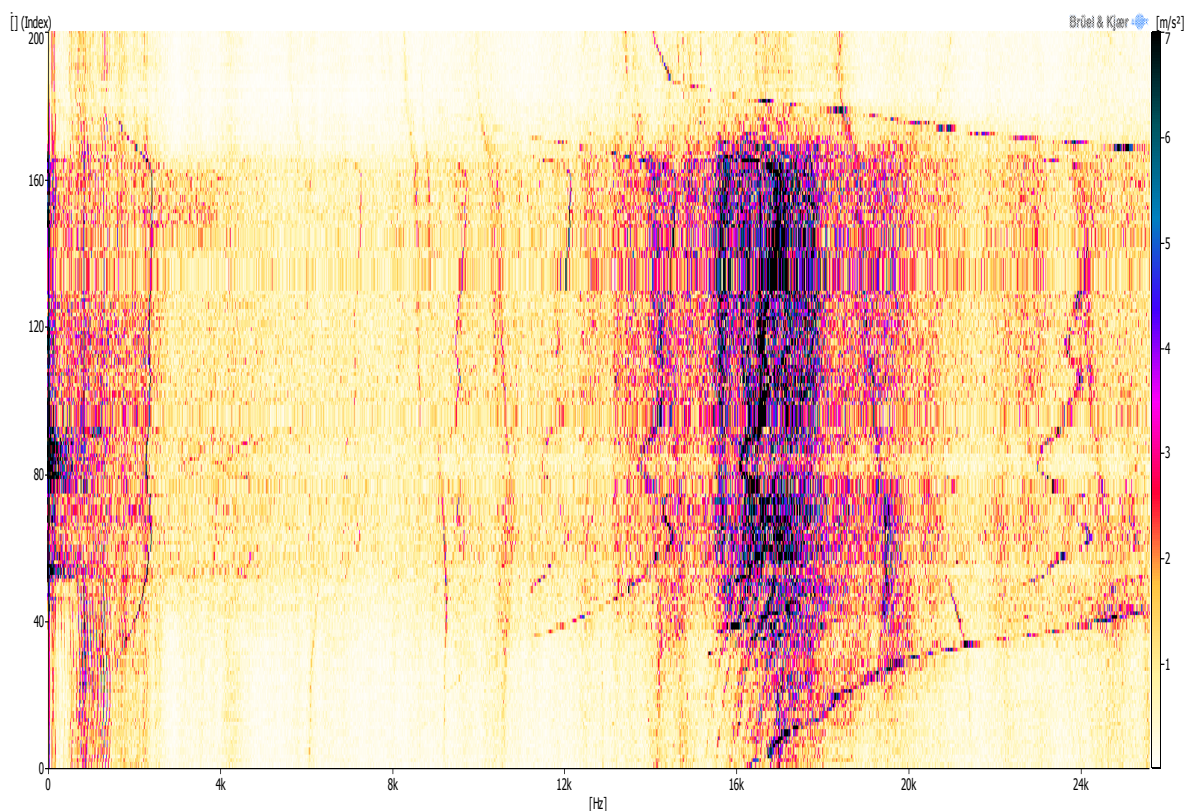


Obrázek 32: Vibrační spektrum

Otáčky turbodmychadla budeme opět vyhodnocovat z křivky prvního otáčkového řádu, který se na tomto vibračním multispektru objevil přibližně na 2 kHz. Amplituda je velice dobře čitelná v celém rozsahu měření. Z tohoto důvodu zobrazíme širší frekvenční rozsah (obrázek 33).

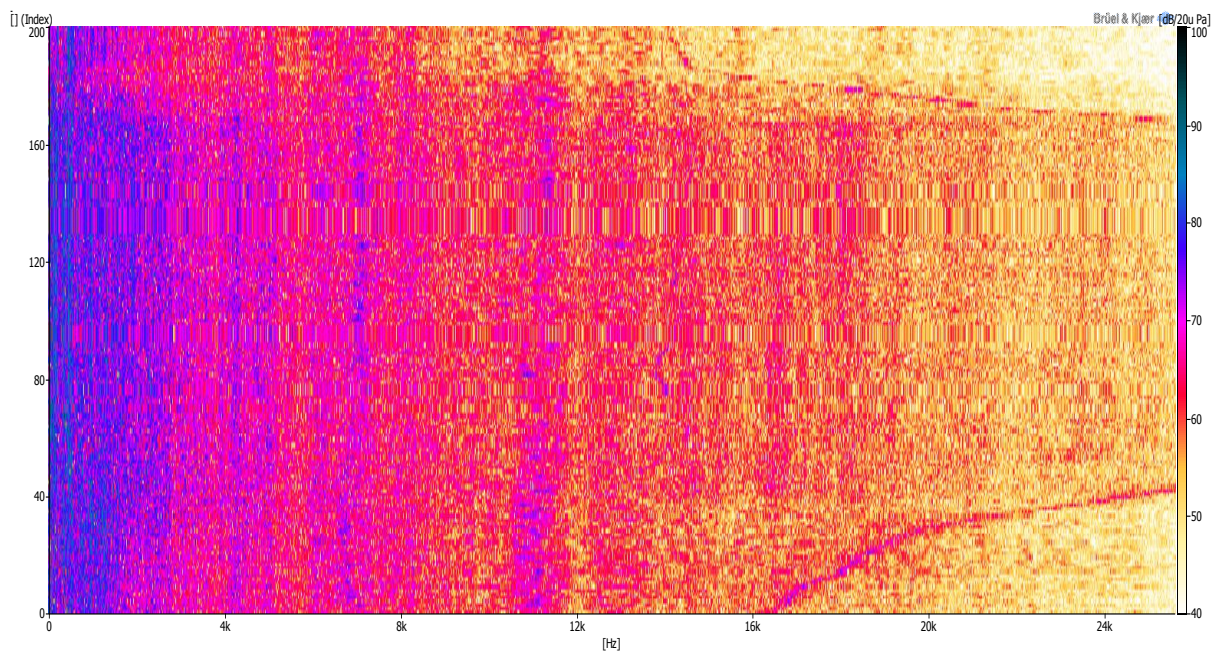


Obrázek 33: Vibrační multispektrum - zvětšení prvního otáčkového řádu



Obrázek 34: Vibrační multispektrum

U této zkoušky se hodnoty amplitud dostaly až za hranici našeho měření. Výsledné amplitudy dvanáctého otáčkového řádu jsou zkreslené ve vibračním a i zvukovém multispektru a nedají se použít k vyhodnocení měření.



Obrázek 35: Zvukové multispektrum

7 Závěr a doporučení pro využití v laboratořích KVM

Cílem práce bylo zhodnocení výše uvedených způsobů, kterými bylo měření prováděno a nalezení optimálního řešení pro měření otáček turbodmychadla v laboratořích KVM.

Měření laserovým snímačem

Tento způsob měření vyžaduje otvor, aby mohl laserový snímač zaznamenávat rotující značku na lopatce kompresoru. Je tedy nutné odstranit z měřeného motoru sací potrubí, či znehodnotit skříň turbodmychadla. Snímač je většinou připevněn na nějakém držáku, či stativu vedle měřeného objektu. Při měření tak může dojít ke ztracení kontaktu s reflexní značkou vlivem vibrací motoru nebo posunu laserového snímače. Výhodou tohoto měření je, že dostaneme přesný počet otáček, bez využití složitých analýz a přepočtů. Tento způsob měření vyhodnocuje výsledky pouze do 200 RPM (otáček za minutu), při měření nad touto hodnotou jsou výsledky zkreslené. Způsob měření laserovým snímačem není optimální způsob pro využití v laboratořích KVM.

Měření indukčním snímačem

Měření otáček indukčním snímačem opět vyžaduje otvor pro zmagnetování utahovací matice kompresoru. Matice musí být také dostatečně vysunuta do sacího potrubí, aby indukční snímač zaznamenal měnící se magnetické póly. Tento způsob měření také nedoporučuji pro měření otáček na jednotlivých stanovištích v laboratořích KVM.

Měření otáček analýzou zvuku

Měření tohoto typu využívá nedokonalosti geometrie lopatek na kompresoru. Tato metoda se tedy dá využít v případě, že kompresor nebude mít dokonalou geometrii lopatek a bude při zvyšujících se otáčkách vydávat zvuk. Většina vyráběných kompresorů nemívá dokonalou geometrii lopatek. Můžeme tuto metodu měření využít u většiny turbodmychadel. Měření je bezkontaktní, to umožňuje měřit otáčky turbodmychadla na jakémkoliv motoru bez potřebných úprav. Frekvenční analýzou a zobrazením zvukového multispektra vyhodnotíme otáčky kompresoru. Tento způsob měření doporučuji v kombinaci s vibrační metodou měření.

Měření otáček z vibrací turbodmychadla

Tento způsob měření také využívá nedokonalosti výroby, v tomto případě se nejedná o geometrii, ale o vyvážení turbodmychadla. Využíváme nevývážků k určení otáček turbodmychadla. Měření otáček z vibrací je spolehlivá metoda, která nevyžaduje žádné úpravy sacího potrubí. Můžeme tuto metodu aplikovat u všech typů motorů. Nevýhodou je nutnost připevnění snímače na skříň turbodmychadla. Při dlouhodobějším měření na motoru může stoupající teplota skříně zahřát snímač na vysokou teplotu, při které by se mohly měřené hodnoty začít zkreslovat. Vibrační metoda je optimální pro využití v laboratořích KVM.

Závěr

Z uvedených metod, na základě zkušeností z provedených měření, doporučuji používat v laboratořích KVM metodu měření otáček turbodmychadla z vibrací a pomocí analýzy zvuku. Tyto metody se dají použít bez úpravy sacího potrubí a bez jakéhokoliv znehodnocení motoru. Doporučuji použití těchto dvou metod současně, dosáhneme tak přesného výsledku bez náročné přípravy měření.

8 Použité zdroje a literatura

1. Wikipedia. En.wikipedia.org.[Online] 2010.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger>
2. Katalog automobilu. [Online] 2010. <http://clanky.katalog-automobilu.cz/slovník-pojmu-automobily/turbo-historie-a-soucasnost/>
3. Turbodmychadlo webnode. [Online] 2010.
<http://turbodmychadlo.webnode.cz/konstrukce-turbodmychadla/historie-vyvoje/>
4. AUTO. [Online] 2010. <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani-16778>
5. Brüel & Kjaer. [Online] 2010.
<http://www.bksv.com/products/pulseanalyzerplatform.aspx>
6. **Rolf Gscheidle a kolektiv.** *Příručka pro automechanika*. Praha 2007
7. **Beneš, Štěpán.** *Technická diagnostika*. Liberec: TUL 2003
8. **Smetana, Ctirad a kolektiv.** *Hluk a vibrace*. Praha 1998
9. **Tůma, Jiří.** *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů využitím FFT*. Praha 1997

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Porche 911 Turbo	10
Obrázek 2: VW turbodmychadlo	11
Obrázek 3: Schéma zapojení turbodmychadla s přidavným mechanickým dmychadlem	13
Obrázek 4: Roodsovo dmychadlo – třízubé	15
Obrázek 5: Nedostatečné vysunutí matice v nátrubku	17
Obrázek 6: Zkušebna ČZ Turbo Strakonice	18
Obrázek 7: Připevnění snímače vířivých proudů	19
Obrázek 8: Analyzátor PULSE	22
Obrázek 9: Programové prostředí LabShop	24
Obrázek 10: Dopad laserového paprsku na lopatky kompresoru	25
Obrázek 11: Měření laserovým snímačem	26
Obrázek 12: Měření indukčním snímačem	26
Obrázek 13: Časový průběh měření	27
Obrázek 14: Časový průběh měření – zvětšený výřez obrázku 13	27
Obrázek 15: Spektrum indukčního měření	28
Obrázek 16: Vibrační snímač 4508 B	28
Obrázek 17: Spektrum vibrací	29
Obrázek 18: Časový průběh vibrací	29
Obrázek 19: Časový průběh vibrací – zvětšený výřez z obrázku 18	30
Obrázek 20: Řádová analýza	31
Obrázek 21: Multispektrum FFT	31
Obrázek 22: Multispektrum FFT – zvětšená křivka prvního řádu	32

Obrázek 23: Mikrofon	33
Obrázek 24: Měřicí stanoviště Cummins – vibrační snímač	33
Obrázek 25: Vibrační spektrum	34
Obrázek 26: Zvukové multispektrum	34
Obrázek 27: Vibrační spektrum – zvětšená křivka prvního řádu	35
Obrázek 28: Spektrum vibrací – časový průběh	36
Obrázek 29: Vibrační multispektrum	36
Obrázek 30: Zvukové multispektrum	37
Obrázek 31: Záznam měření na stanovišti motoru Zetor	38
Obrázek 32: Vibrační spektrum	39
Obrázek 33: Vibrační multispektrum – zvětšení prvního otáčkového řádu	39
Obrázek 34: Vibrační multispektrum	40
Obrázek 35: Zvukové multispektrum	40